

静态箱法原位观测草原 CO₂ 通量的探讨

杜 睿, 王庚辰, 吕达仁, 万晓伟, 孔琴心

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 根据 IMGRASS 研究计划, 分析草原土壤-植被系统 CO₂ 排放与吸收的生物机理和静态箱法在草地 CO₂ 通量原位观测实验中所遇到的难点问题, 研究设计一套简单易行的静态箱实验方法, 通过 1999、2000 年连续两年在内蒙古半干旱草原的原位观测实验尝试, 解决了利用静态箱法原位观测草原土壤-植被系统与大气间 CO₂ 交换通量偏离实际的难题, 校正了观测值的偏离, 并实例分析校正了 1998 年内蒙古半干旱典型草原羊草草原土壤-植被系统 CO₂ 通量, 揭示了羊草草原 CO₂ 通量的变化规律特征。

关键词: 静态箱法; CO₂ 通量; 草原土壤-植被系统; 内蒙古羊草草原

In Situ Measurements of CO₂ Flux in Grassland Ecosystem by Closed Chamber Technique

DU Rui, WANG Geng-Chen, LU Da-Ren, WAN Xiao-Wei, KONG Qin-Xin (Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2167~2174.

Abstract: As a part of IMGRASS project, the biological mechanism of CO₂ emission and absorption in grassland soil-vegetation system is analyzed and the problems of the in situ measurement of CO₂ fluxes by closed chamber technique are discussed in this paper.

Some results of experiments show that using the static chamber technique for the measurements of CO₂ fluxes from soil-vegetation system is improper due to the limitation of chamber technique. CO₂ fluxes obtained by the static chamber technique should be corrected by different treatments, otherwise, the value of observation could not be accord with the fact. Based on the theory of CO₂ production and emission, to modify CO₂ fluxes obtained by the static chamber technique is theoretical feasible, however, in practice, the modification is limited due to lack of the large correlative observation data.

For this purpose, a simple and convenient in-situ measurement manner by static chamber technique is designed. Two different manners to deal with the plant are used in this examination. One of them is the chamber with natural aboveground plants inside, while another is a chamber with mowing aboveground plants. The experiment is conducted by three different manners, those are: transparent chamber, mowing (A); transparent chamber, non-mowing (B); dark chamber, non-mowing (C); Based on the theory of CO₂ biological production process, the formulas of these different treatment manners are shown as below:

$$\text{Flux (A)} = F_{SR}(1) \quad \text{Flux (B)} = F_p + F_{VR} + F_{SR}(2) \quad \text{Flux (C)} = F_{VR} + F_{SR} \quad (3)$$

where Flux(A), Flux(B) and Flux(C) are CO₂ fluxes obtained by manner A, B and C respectively, F_{SR} is the CO₂ flux produced by soil respiration, F_p is the CO₂ flux produced by photosynthesis, F_{VR} is the CO₂ flux produced by vegetation respiration. This experiment design was applied in field measurements in two successive observation years (1999 and 2000), and the CO₂ fluxes of soil-vegetation system are obtained.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49790025, 40075028); 中国科学院大气物理研究所前沿创新基金 (8-3305) 资助项目

收稿日期: 2001-07-18; **修订日期:** 2002-11-12

作者简介: 杜睿 (1969-), 女, 河南开封市人, 博士, 副研究员。主要从事温室效应与全球气候变化的研究。E-mail: ruidu2000@yahoo.com

The values of CO₂ fluxes obtained by using closed chamber in typical semi-arid *Aneurolepidium Chinense* grassland soil-vegetation system in Inner Mongolia in 1998 are corrected and some variation characters of CO₂ fluxes in *A. chinense* steppe are as below. During the grassland growing period, in daytime soil-vegetation system absorbs CO₂, while in nighttime the system takes as CO₂ source. However, in the later growing period, in daytime the system may absorb or emit CO₂ in dependence of the meteorological conditions, and in the telophase, either the daytime or the nighttime the system only emits CO₂. In addition, the results also show a obvious diurnal variation of CO₂ flux in the grassland vigorous growing period in daytime. There is a clear double-peak during the daytime, the high peak appears in morning, whereas, the low one appears in afternoon. Since the later growing period, CO₂ emission is becoming a main exchanged pattern, although the CO₂ emission flux is obviously reduced.

Key words: closed chamber technique; CO₂ flux; grassland soil-vegetation system; Inner Mongolia *Aneurolepidium chinense* Steppe

文章编号:1000-0933(2002)12-2167-08 中图分类号:Q948 文献标识码:A

CO₂ 作为大气中重要的温室气体,在大气圈、海洋和陆地生态系统 3 个主要的碳库之间进行交换,由于人类活动的干扰,破坏了三者之间的交换平衡,尽管科学家们可以精确的测定大气中 CO₂ 的浓度,但对于海洋和陆地生态系统中碳储量的测定存在着较大的不确定性。由于陆地生态系统是人们认识或掌握的较少的碳库^[1],草原生态系统是陆地生态系统的主要组成部分,它是地球陆地面积仅次于森林的第 2 个绿色覆被层,约占全球植被生物量的 36%^[2]。CO₂ 作为重要的温室气体同时又是碳循环过程中的关键物质,在草地土壤-植被系统与大气间传输的通量问题已成为科学家所关注的焦点问题之一。

由于草地覆盖着地球上许多不能生长森林或不宜垦殖为农田的生态环境较严酷的地区,缺水少水以及恶劣的自然环境使得需要精密仪器的通量观测方法如:涡度相关法、通量梯度法等微气象学法难以在草原生态系统中运用展开。箱法尤其静态箱法因其精度高、造价低、易操作、机动性强、适宜于进行机理过程研究^[3]等优点被广泛的应用于草地温室气体通量的观测中^[4~9]。鉴于箱法本身所固有的局限性,如破坏了被测表面上方空气的自然湍流状态,箱盖关闭后箱内的温度和湿度都可能发生变化,在一定程度上会影响微量气体的真实排放情况,从而导致测量值的失真。尤其是对于 CO₂ 通量的测定,已有的箱法通常是利用暗箱法^[7,8],只测得土壤排放的 CO₂ 通量,不能准确的反映田间 CO₂ 的真实通量,而是需要针对箱内情况与自然环境情况的可能差异作出订正。自 1998 年起在内蒙古典型草原进行一系列的静态箱法观测草地主要温室气体通量的比对实验^[10],结果发现:采用静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量结果,需要进行合理订正。根据已发现的问题,本文分析研究了 1998、1999、2000 年在植物生长旺盛期,对静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量结果的订正实验结果,并对修正后 1998 年羊草草原土壤-植被系统 CO₂ 通量特征进行了研究分析。

1 野外实验

1.1 实验样地概况

本研究订正实验地点设在中国科学院内蒙古草原定位研究站站外围栏封育地内,羊草草原 CO₂ 通量观测点位于中国科学院内蒙古草原定位研究站羊草草原围栏样地内,有关此两实验地的背景介绍见文献^[10,11]。

1.2 实验设计与原理

根据比对实验结果选用中等大小箱体 40cm×40cm×25cm 进行采样^[10]。草地土壤-植被系统 CO₂ 通量的特点是由草地地表植物光合作用 CO₂ 净通量(F_p)、地表植物呼吸作用 CO₂ 净通量(F_{VR})其中光呼吸所产生的 CO₂ 通量表示为 F_{VLR} ,暗呼吸产生的表示为 F_{VDR} 以及土壤呼吸作用即地下动植物的呼吸作用 CO₂ 净通量(F_{SR})各种数据用过程的综合体现结果。在其他更为先进可靠的通量测试方法因环境条件的局限无法较广泛的推广应用的条件下,运用静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量,分别于 1999 年、2000

年 8 月中、下旬,植物生长旺盛期利用明、暗两种罩箱方式^[10],采用地表植物齐地表割草和不割草的处理方式,进行重复比对实验。即明箱、割草(A)、明箱、不割草(B)、暗箱、不割草(C)3 种处理方式,每种处理 2 个平行。依据其生物作用过程特点则 3 种处理方式下草地土壤-植被系统 CO₂ 通量关系式可分别用下列公式表示:

$$\text{Flux(A)} = F_{SR}(1) \quad \text{Flux(B)} = F_P + F_{VR} + F_{SR}(2) \quad \text{Flux(C)} = F_{VR} + F_{SR}(3)$$

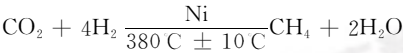
上述 3 个公式联立方程,可分别得到静态箱法测量时草地 3 种生物作用过程中 CO₂ 的净通量值,根据已有的关于此草地土壤呼吸及群落光合作用的特征研究^[12,13]分别修订 F_P 、 F_{VR} 、 F_{SR} ,从而对用透明箱体所测得 CO₂ 通量进行修订。

1.3 气体样品的采集

选择一天中清晨,午间,正午,午后,下午,傍晚和晚上进行通量观测,天气状况大多为晴天,个别时间为阴天。在样地内选一地面较平坦,植物长势均匀,面积是 10m×10m 的样方进行观测。1999 年采样时间是在罩箱 0min、15min、30min 时分别用 100ml 医用注射器连续采集箱内气体 200ml 注入采样气袋内,在每次采样同时,对于各箱内的气温、地表温度、地下 10cm 土壤温度用 TM222 型便携式数字温度计测量,温度计的测量范围:−30~+50℃,测量准确度为 0.5℃,读数分辨率为 0.1℃,用以测量罩箱后箱体内外环境的变化情况,以评价其对 CO₂ 排放通量的影响。2000 年采样间隔时间缩短分别在罩箱 0min、5min、10min 用同样的方法进行采样,样品即时进行分析。1998 年 5 月到 1999 年 5 月连续一年进行羊草草原围栏样地内 CO₂ 通量观测,其中生长季节(5~9 月份)采样频率为 1 次/周,自 10 月份进入冬季采样频率为 1 次/月,每次采样时间大多是 9:00~11:00 或 14:00~16:00 之间在罩箱 0min、20min、40min、60min 时用同样的方法进行采样,样品即时进行分析。

1.4 气体样品的检测分析

CO₂ 检测器为 FID(氢焰离子化检测器),由于 FID 仅对有机物有强的响应信号,而对一般的无机成分没有响应,因此在 CO₂ 进入 FID 前要经镍触媒转化器(Ni),在 H₂ 的作用下转化生成 CH₄ 而被检测,其反应方程式是:



载气为高纯氮气,氢气为燃气,空气为助燃气,流速分别为:25ml/min,40ml/min,450ml/min 检测器、分离柱温度分别为 150℃和 65℃。4h 之内 15 次标样(CO₂367×10⁶ 体积百分比,底气为空气)重复分析结果的标准偏差(STDS)为 2.75×10⁶ 体积百分比,变异系数为 0.75%。

1.5 通量的计算

在单位面积和单位时间内气体质量的变化即该气体的通量,用公式表示为:

$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta C}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot h \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

式中, F 为气体通量(Flux), ρ 为试验时温度下的气体密度, Δm 和 ΔC 分别是 Δt 时间内的采集箱中变化的气体质量和混合比浓度, h 、 A 、 V 分别为箱高、底面积和体积。气体通量(F)为负值时表示被观测系统从大气中吸收该气体,正值时表示被观测系统向大气排放该气体。

2 实验结果与分析

2.1 静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量的偏差

2.1.1 对于植物吸收 CO₂ 的通量的影响 1999 年自 8 月 15 日至 8 月 22 日在不同的时间段共进行 22 次,2000 年自 8 月 25 日至 9 月 1 日在同一地点共进行 12 次,采样时间分别在罩箱 0、5min、10min、15min、30min 时进行。其中,4:00~5:00 2 次,7:00 2 次,9:00~10:00 9 次,13:00 2 次,14:00~16:00 10 次,17:00~18:00 4 次,19:00~21:00 4 次,22:00 1 次。依据前文所述的 3 个通量方程式,可以分别计算出 F_P 、 F_{VR} 、 F_{SR} 。与已有的静态箱法观测草原植物的光合作用特征的研究结果^[12,14]相比较发现,运用透明密闭箱测量草地土壤-植物系统 CO₂ 通量,在一天中不同的时段不同的罩箱时间对于土壤-植物系统 CO₂ 通量的偏差主要由

于箱罩盖上基座后箱内小环境的变化导致地上植物正常的光合作用与呼吸作用发生变化,由此两种生物过程所产生的 CO₂ 通量发生了不同程度的偏离,在植物的生长期尤其是在晴朗的早晨、上午、午间、下午等时段,透明的密闭箱体罩箱后严重抑制了植物的光合作用对于 CO₂ 的利用,从而导致该种箱体所测土壤-植被系统 CO₂ 通量的偏差。

研究表明,在一天中不同的时段不同的光照条件下,罩箱降低了植物光合作用吸收 CO₂ 的能力,罩箱后植物对 CO₂ 的吸收通量与同等条件下非罩箱植物的 CO₂ 的吸收通量相比,后者约是前者的 2~16 倍,其中早晨日照强度低,气温低植物逐渐开始进行光合作用,罩箱后对于植物光合作用的影响最低,15 min 后 CO₂ 的吸收通量降低了 100%左右,傍晚日落前,罩箱 15min 后 CO₂ 的吸收通量降低了 200%~500%,上午和午间由于日照较强气温较高,箱体盖上后,对于植物的光合作用吸收 CO₂ 通量的抑制作用最显著,罩箱后 CO₂ 的吸收通量降低了 200%~1500%,下午日照强度、气温开始降低,罩箱后 CO₂ 的吸收通量降低了 200%~1400%。数据统计分析表明:在上午、午间和下午密闭箱法对于 CO₂ 的通量的准确性的影响最显著,随着罩箱时间的增长,罩箱对于植物吸收 CO₂ 的光合作用的抑制作用增大。表 1 是密闭箱法对于一天中不同时段地上植物吸收 CO₂ 通量的偏离程度的影响,表 2 是不同的罩箱时间长度对于植物吸收 CO₂ 通量的偏离程度的影响。

表 1 不同时段静态箱法降低植物吸 CO₂ 通量的程度

Table 1 The reduction degree of CO₂ absorption flux by using closed chamber in different period of time

	清晨 Early morning	上午 Forenoon	午间 Noon	下午 Afternoon	傍晚 Evening
<i>n</i>	2	13	3	14	4
平均值 Mean	1.59	7.12	7.16	6.53	3.93
标准偏差 Standard deviation	0.30	3.70	3.18	3.33	1.47

表 2 罩箱时间长度对降低植物吸收 CO₂ 通量的影响

Table 2 The effect of length of closing time on reduction degree of CO₂ absorption flux

	上午 Forenoon			下午 Afternoon		
	5min	10min	15min	5min	10min	15min
<i>n</i>	4	4	5	4	4	6
平均值 Mean	4.82	5.80	10.01	3.65	5.31	9.27
标准偏差 Standard deviation	1.77	2.43	4.10	1.75	1.62	2.93

2.1.2 静态箱法对于草地植物呼吸作用释放 CO₂ 通量的影响 研究表明^[10],利用静态箱法观测 CO₂ 通量,由于罩箱后箱内小环境的变化,对于植物的光合作用影响较大,短时间内对于植物的呼吸作用同样会产生影响。根据已有的该地区草原植物的暗呼吸作用特征的研究结果^[15],将静态箱法所观测的植物呼吸作用释放 CO₂ 通量进行比较,统计分析表明,在日落后至日出前,静态箱法所观测的草原植物呼吸作用(暗呼吸)所释放 CO₂ 通量的结果,平均扩大了 1.28 倍,标准偏差为 2.31,其中 $n=10$ $p<0.05$ 。白天光照条件较好的情况下,罩箱对于植物的光呼吸作用同样产生影响。植物的光合作用与光呼吸作用同步进行,通常可能将光合作用已固定的 20%~40% 的碳变化 CO₂ 释放出去^[16],但不同的植物其光呼吸强度各不相同,在生理上 C₄ 植物一般比 C₃ 植物的光合作用强,光呼吸弱,根据 C₄ 和 C₃ 植物的光合特征比较发现 C₃ 植物的光呼吸作用强,易检测而 C₄ 植物光呼吸少不易测出^[16],而且 C₄ 植物在内蒙古锡林河流域草原植物中占主导地位,由于草原植物光合午休现象的普遍存在,光呼吸作用在光合作用下存在并且在光合作用进行条件下,光呼吸速率与温度成直线正相关^[17]。透明箱体罩箱后,箱内温度变化以气温最显著^[10],可能导致罩箱后光合作用被抑制,光呼吸作用相应发生提高。但迄今为止,尚未有关于草原植物光呼吸日进程特征的研究报道,只好采用间接比较的方法即:利用光照条件下罩箱后 30min 内气温升高变化的平均值,根据光呼吸速率与温度的线性关系: $y=a+0.2866T^{[17]}$,推算出白天透明箱体罩箱后,由于温度升高引起光呼吸速率的提高而导致增加植物释放的 CO₂ 通量的变化与温度增长的关系: $\Delta y=0.2866 \times \Delta T$ 即: $\Delta F_{PR}=0.2866 \times \Delta T$ 。1998~2000 年的箱法比对实验的统计分析表明:白天日照条件下罩箱后 30min 以内,箱内气温平均上升 3.47℃,标准偏差为 3.40,其中 $n=61$ $p<0.05$ 。故白天日照条件下罩箱后 30min 以内,其植物光呼吸释放的 CO₂ 通量是无罩箱的 1.99 倍。

2.1.3 静态箱法对于草地土壤-植被系统 CO₂ 通量的校正系数 土壤排放 CO₂ 气体通量的观测,因短时间罩箱对于土壤的内部环境的扰动相对弱化,利用箱法观测土壤排放 CO₂ 气体通量在世界范围内应用都

较为普遍。上述研究分析表明:利用静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量,由于 CO₂ 气体的生物产生机理的复杂过程,导致静态箱法本身的技术缺憾在观测过程中更加突出。主要体现在罩箱后,明显干扰了地上植物与 CO₂ 气体交换相关的主要生理过程,导致静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量的偏离。白天在有效光照强度下,透明箱体观测的 CO₂ 气体通量的组成式是 $F=F_P+F_{VLR}+F_{SR}$,晚上或阴天组成式是 $F=F_{VDR}+F_{SR}$ 。实验研究表明,在内蒙古实验观测场地内由于罩箱的影响 F_{VLR} 和 F_{VDR} 分别是自然状态下的 1.99 和 2.28 倍,由于罩箱对于植物的光合作用影响更显著,针对不同的时间段进行订正,最后算出订正值与实测值之间的定量关系,表 3 是不同的观测时段静态箱法测量草地土壤-植被系统 CO₂ 通量的校正值与田间实测值之间的增长率。

表 3 静态箱法不同时段草地土壤-植被系统 CO₂ 通量校正值与田间观测值的增长率
Table 3 The rise ratio of the revised and observed value of CO₂ flux from grassland soil and vegetation system in different period time by closed chamber

	夜间 Night	清晨 Early morning	上午 Forenoon	正午 Noon	下午 Afternoon	傍晚 Evening
<i>n</i>	9	6	14	3	13	4
平均值 * Mean	0.5	0.9	42.6 [#]	12.7 [#]	40.6 [#]	3.0
标准偏差 Standard deviation	0.7	2	72	9.6	56.1	0.4

表中 * 是校正值与田间观测值增长率的平均值; # 是校正值与田间观测值差值的绝对值平均值。* The mean of rise ratio of the revised and observed value; # ;The mean of absolute value of margin between revised and field observed value

利用静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量在光照强度较弱或无光照的条件下,由于植物光合作用较弱或停滞,观测结果相对接近真实情况,而在光照强的条件下植物光合作用较强,其结果与真实情况偏离较大(见表 3)。这样在正常条件下,利用静态箱法观测草地土壤-植被系统 CO₂ 通量,其结果必需进行订正,否则其结果将可能产生误差。

2.2 羊草草地土壤-植被系统 CO₂ 通量的订正结果

2.2.1 羊草草地土壤-植被系统 CO₂ 通量日变化 草地土壤-植被系统与大气中 CO₂ 的交换方式,既吸收大气中的 CO₂ 同时又向大气中排放 CO₂,不仅具有明显地季节变化同时也具有日变化特征。日变化的研究对于给出一个较为准确的日平均值以便准确的估算年通量值;以及找到一天内比较具有代表性的排放通量的测定时间,以此时的测定值近似代替日均值都有及其重要的意义。1998 年在内蒙古典型草原羊草草地,在其不同生长物候期的典型代表日,利用静态箱法对其进行通量日变化观测。图 1~图 4 分别是羊草草原不同的生长物候期(以建群种羊草的物候期为准即:抽穗前期 6 月 7 日、开花期 7 月 8 日、结实后期 8 月 12 日、果后营养期 9 月 9 日)草地土壤-植被系统 CO₂ 通量日变化的田间观测与修订结果的比较。

图 1~图 4 中明显看出未经修订的田间实测 CO₂ 通量的日变化特征是:CO₂ 排放高峰出现在夜晚,白天以吸收、排放两种方式进行交换,而且以排放为主。根据田间实测 CO₂ 通量,在羊草草原植物的生长期,草地土壤-植被系统主要以排放方式与大气进行 CO₂ 交换。修订后的 CO₂ 通量日变化特征表现为:在草原植物生长旺盛期,草地土壤-植被系统白天主要以吸收方式进行交换,表现为明显的双峰型,高峰值主要出现在上午时段,午间吸收降低,下午时段出现小峰值,晚上以排放方式进行 CO₂ 气体交换。但到植物生长后期,晚上仍以排放方式而白天以吸收、排放两种方式进行交换(见图 4),并开始以排放为主,排放峰值在傍晚和夜间。这与植物生长后期,能量代谢缓慢,光合作用停滞有关。

2.2.2 草原植物不同生长期对于 CO₂ 通量日变化的影响 羊草草原植物不同的生长物候期对于草原土壤-植被系统 CO₂ 通量日变化具有显著的影响(见图 5、图 6)。植物生长的旺盛期,其生理代谢过程活跃,同化与异化作用(即光合作用与呼吸作用)强,表现有较强的吸收和排放 CO₂ 现象。图 5 中可看出夜间排放高峰值出现在植物的生长旺盛期(开期期和结实期),图 6 则可看出同期白天较强的光合作用产生的较大的 CO₂ 吸收通量,在果后营养期植物的生理代谢活性已经开始降低,即将进入立枯期,此时不论光合作用还是呼吸作用均下降,而光合作用降低的更为显著,进入立枯期后,植物的光合作用将会停滞,草原土壤-植被系统仅以较弱的植物和土壤呼吸作用向大气中排放 CO₂。表 4 是羊草草原土壤-植被系统不同的生长

期 CO₂ 日排放的情况,说明植物不同的生长阶段植物生理代谢活动的强弱以及相关联的地下生物活动,直接影响着草原土壤-植被系统 CO₂ 的交换,同时也受到主要的气候和环境因素的影响与调控。修订后的 CO₂ 通量更接近真实情况(见表 4)。

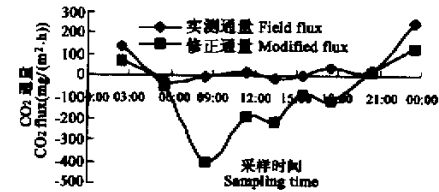


图 1 羊草草原抽穗前期 CO₂ 通量日变化的校正比较
Fig. 1 Comparison modified diurnal variation of CO₂ flux in *A. chinense* steppe during before heading period

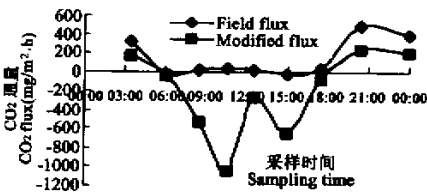


图 2 羊草草原开花期 CO₂ 通量日变化的校正比较
Fig. 2 Comparison modified diurnal variation of CO₂ flux in *A. chinense* steppe during flowering period

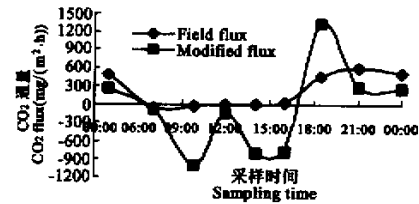


图 3 羊草草原结实期 CO₂ 通量日变化的校正比较
Fig. 3 Comparison modified diurnal variation of CO₂ flux in *A. chinense* steppe during seeding period

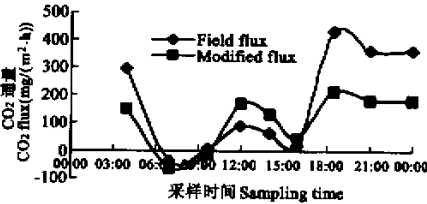


图 4 羊草草原果后营养期 CO₂ 通量日变化的校正比较
Fig. 4 Comparison modified diurnal variation of CO₂ flux in *A. chinense* steppe nutrient after seed period

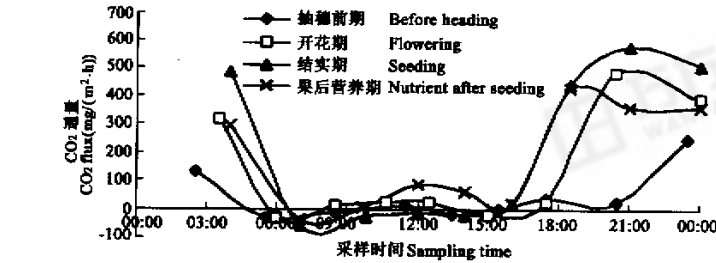


图 5 不同生长期静态箱法观测羊草草原 CO₂ 通量校正前日变化
Fig. 5 Diurnal variation of CO₂ unmodified flux in *A. chinense* steppe during different growing period by chamber method

3 结论

3.1 利用静态箱法直接观测草地 CO₂ 气体交换通量,由于箱法本身的缺陷,使得的观测值易偏离实际情况,故静态箱法不适于进行观测土壤-植被系统 CO₂ 通量。但在目前环境条件的局限下,静态箱法仍然较为普遍地用来观测土壤-植被系统 CO₂ 通量,本研究依据草原生态系统的生物过程特征,利用明、暗箱与地面植物割弃和非割弃的不同处理方式相结合,对其测定值进行纠正,在没有真值的情况下,校订后 CO₂ 通量是接近符合实际情况的;同时也为解决当前围绕箱法测定土壤-植被系统 CO₂ 通量提供一参考依据。

3.2 这种利用生物过程与排放的生物过程进行修订 CO₂ 通量的方法,在理论上可行但在实际定量分析校订的过程中,由于需要大量的相关生物过程的可重复性观测样本数,较大的工作量,对于获得统计分析校

订系数的准确修订同样存在着难点。如果能在进一步的研究中找出 CO₂ 通量静态箱法的观测值与环境因子和生物因子的综合相关系数,修正结果会更符合实际情况。

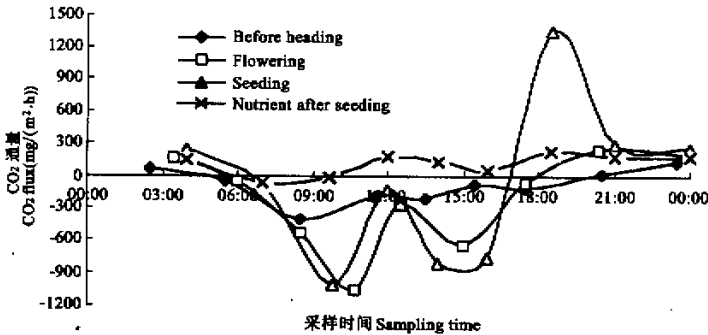


图 6 不同生长期静态箱法观测羊草草原 CO₂ 通量值校正后日变化情况

Fig. 6 Modified diurnal variation of CO₂ flux in *A. chinense* steppe during different growing period by closed chamber method

表 4 不同生长期羊草草原土壤-植被系统 CO₂ 日排放的比较

Table 4 Comparison of CO₂ diurnal emission from *A. chinense* steppe soil-vegetation system in different growth period

生长期 Growth period	日均值(实测) Diurnal mean (observed) (mg/(m ² · h))	日均值(校正) Diurnal mean (revised) (mg/(m ² · h))	日排放量(实测) Diurnal emission (observed) (g/m ²)	日排放量(校正) Diurnal emission (revised) (g/m ²)
抽穗前期 Before bleeding	51	—88	1.22	—2.10
开花期 Flowering	168	—157	4.03	—3.78
结实期 Seeding	257	—12	6.16	—0.28
果后营养期 Nutrient after seeding	198	114	4.75	2.74

3.3 修订结果表明草地 CO₂ 通量的日变化特征主要表现为:在草原植物生长期,草地土壤-植被系统白天主要以吸收方式进行交换,高峰值主要出现在上午时段,晚上以排放方式进行 CO₂ 气体交换。但到植物生长后期,晚上仍以排放方式而白天则以吸收、排放两种方式进行交换,进入生长末期,草地昼夜均以排放为主要交换方式。

3.4 不同的草原植物生长物候期,草地 CO₂ 通量的日变化具有明显的影响。在草原植物生长旺盛期,草地土壤-植被系统白天主要以吸收方式进行交换,并表现为明显的双峰型,高峰值主要出现在上午时段,午间吸收降低,下午时段出现小峰值;晚上以排放方式进行 CO₂ 气体交换。但到植物生长前、后期,晚上仍以排放方式而白天以吸收、排放两种方式进行交换,到生长末期草地昼夜均以排放为主要交换方式,但排放量明显降低。

参考文献

[1] The Subcommittee on Global Change Research, Committee on Environment and Natural Resources of the National Science and Technology Council, *Our Changing Planet*; The FY2000 US global change research program[R]. Washington, 1999. 1~1000.

[2] Zhang X S(张新时). Eco-economic foundations of the grassland and its patterns. *Science and technology review*(in Chinese)(科技导报), 2000, 8: 3~7.

[3] Hutchingson, Davidson E A Processes for production and consumption of gaseous nitrogen oxides in s. oil. In: Harper, L. A. *et al.* Agricultural ecosystem effects on trace gases and climate change. ASA Spec. Publ. 55.

ASAA,CSSA. and SSSA, Madison, WI 1993.

[4] Du R(杜睿),Chen G X(陈冠雄). The effect of different grazing intensity on N₂O and CH₄ flux in grassland ecosystem. *Journal of Henan University(natural science)*(in Chinese)(河南大学学报(自然版)),1997,**27**(6):79~85.

[5] Wang G C(王庚辰),Du R(杜睿),Wang Y F(王艳芬) *et al.* . Characteristics of N₂O and CH₄ fluxes and their seasonal variations from Inner Mongolia grassland. *Acta Agrestia Sinica*(in Chinese)(草地学报),1998,**6**(4):305~311.

[6] Du R(杜睿),Wang G C(王庚辰),Lu D R(吕达仁),*et al.* ,The study on diurnal variation in greenhouse gas revenue and expenditure fluxes of *Leymus chinensis* grassland of Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*(in Chinese)(草地学报),1998,**6**(4):258~264.

[7] Liu Y F(刘允芬). A tentative study of CO₂ emission from farmland soil in Tibetan plateau. *Journal of natural resources* (in Chinese)(自然资源学报),1998,**13**(2):181~186.

[8] Dong Y S(董云社),Zhang S(章申),Qi Y C(齐玉春),*et al.* ,The simultaneous measurements of CO₂,N₂O,CH₄ fluxes and their diurnal variation. *Science report*(in Chinese)(科学通报),2000,**45**(3):318~322.

[9] Li Y E(李玉娥),Lin E D(林而达). Effect of variation in land use pattern of natural grassland on its CO₂ emission and CH₄ uptake. *Rural eco-enviromment*(in Chinese)(农村生态环境),2000,**16**(2):14~16.

[10] Du R(杜睿),Wang G C(王庚辰),Lu D R(吕达仁),*et al.* A study of chamber method for In-situ measurements of greenhouse gases fluxes from grassland. *Chinese Journal of atmospheric science*,2000,**24**(4):61~70.

[11] Du R(杜睿),Wang G C(王庚辰),Lu D R(吕达仁),*et al.* Variation characteristics of N₂O and CH₄ fluxes in semi-arid *Leymus chinensis* grassland ecosystem of Inner Mongolia. *Progress in natural science*(in Chinese)(自然科学进展),2001,**11**(6):595~601.

[12] Qi Q H(戚秋慧),Sheng X W(盛修武),Li J S(李济尚). A comparative study on community photosynthetic rate of *Aneurolepidium chinense* grassland in the Siziwang banner, Wulanchabu League Inner Mongolia Region. In: Inner Mongolia grassland ecosystem research station, Academia Sinica ed. *Research on grassland ecosystem*(in Chinese) No. 2 Science press,1988. 75~81.

[13] Cui X Y(崔晓勇),Wang Y F(王艳芬),Du Z C(杜占池),*et al.* , Primary study on soil respiration of main plant communities in typical grasslands in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*(in Chinese)(草地学报),1999,**7**(3):245~250.

[14] Cui X Y(崔晓勇),Du Z C(杜占池),Wang Y F(王艳芬),Photosynthetic characteristics of A semi-arid sandy grassland community in Inner Mongolia. *Acta phytocologica sinica*(in Chinese)(植物生态学报),2000,**24**(5):541~546.

[15] Sheng X W(盛修武),Qi Q H(戚秋慧),Jiang S(姜恕). A comparative study on dark respiration of *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* steppe communities. In: Inner Mongolia grassland ecosystem research station, Academis Sinica ed. *Research on grassland ecosystem*(in Chinese). No. 2 Science press,1988. 93~99.

[16] Pan R Z(潘瑞炽),Dong Y D(董恩得)ed. *Plant physiology*(in Chinese),senior education press,1983.

[17] Du Z C(杜占池),Yang Z G(杨宗贵). A research on internal cause of photosynthetic reduction during midday period in *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* under drought soil condition. In: Inner Mongolia grassland ecosystem research station, Academia Sinica ed. *Research on grassland ecosystem*(in Chinese)No. 2. Science press, 1988. 82~92.