

LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪接气室法在草原群落蒸散量与 CO₂ 交换量测定中的应用

刘芳^{1,2} 王炜^{1*} 朴顺姬¹ 王永利³ 韩芳³

(1 内蒙古大学生态与环境科学系 呼和浩特 010021)

(2 内蒙古工业大学能源与动力工程学院环境工程系 呼和浩特 010051) (3 内蒙古气象局 呼和浩特 010051)

摘要 植物群落蒸散量和 CO₂ 交换量的测定方法多种多样。该文以水分、CO₂ 动态的区域性整合为目标, 开创了一种新的、同时测定群落蒸散量和 CO₂ 交换量的方法——LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪接气室法。借助这种方法测定了内蒙古锡林河流域典型草原区群落蒸散量和 CO₂ 交换量, 取得了较好的结果。该方法将群落的重要生态过程(蒸散与光合、呼吸作用)的测定联系起来, 也因此得到一系列表征群落特性的有用指标; 同时该方法具有精度高、简便易携带、适于野外操作等特点, 经进一步改进后可广泛用于草原、沙地及湿地植物群落的气体通量测定。对于精确研究草原区各种植物群落类型的水分利用、光合和呼吸特性及草原区植被在全球气候变化中的地位 and 作用等有重要的实用价值。

关键词 蒸散量 CO₂ 交换量 LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪 典型草原

NEW METHOD FOR MEASURING EVAPOTRANSPIRATION AND CO₂ ABSORPTION IN GRASSLAND COMMUNITIES USING LI-6262 CO₂/H₂O ANALYSER

LIU Fang^{1,2}, WANG Wei^{1*}, PIAO Shun-Ji¹, WANG Yong-Li³, and HAN Fang³

¹Department of Ecology and Environment Sciences, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China, ²Department of Environment Engineering, School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China, and ³Inner Mongolia Meteorological Administration, Huhhot 010051, China

Abstract Aims Our objective was to develop a new method for simultaneously measuring evapotranspiration and CO₂ absorption in plant communities using the LI-6262 CO₂/H₂O analyzer for regional integration of water and CO₂ dynamics.

Methods We measured evapotranspiration and CO₂ absorption of some plant communities in the typical steppe of the Xilin River Basin, China.

Important findings Our method enabled us to concurrently measure evapotranspiration, photosynthesis and respiration, the important ecological processes of communities and therefore obtain a series of valuable measurements of community characteristics. Our method is precise, the instruments are easily portable, and the method is adaptable for plant communities of steppe, sand lands and wetlands. The method has important practical value for study of the impacts of global change on ecological functions of steppe.

Key words evapotranspiration, CO₂ absorption, LI-6262 CO₂/H₂O analyzer, typical steppe

植物群落蒸散量和 CO₂ 交换量的测定研究是全球变化生态学和生物地球化学领域研究的重要内容, 其测定方法也极其多样。目前, 蒸散量的测定方法大致可以分为: 微气象学法(包括涡度相关法、能量平衡法、空气动力学法、质量平衡法等)、红外遥感法以及 SPAC 综合模拟法、蒸发器测定法和植物生理学法、气候学计算方法等(王安志和裴铁璠,

2001)。这些方法或者测定精度高、但价格昂贵(微气象学法、蒸发器测定法), 或者因样本的代表性问题难以用单株或数株植株的蒸腾量准确地推算出大面积的总蒸腾量(植物生理学法), 或者适用于大面积或流域的测定方法(红外遥感法、气候学计算方法、SPAC 综合模拟法)又存在精度不高等问题。对于 CO₂ 交换量的研究, 其方法主要有箱法(杜睿等,

收稿日期: 2006-03-14 接受日期: 2006-10-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30330120)和国家“973”项目(G2000018604)

感谢内蒙古大学王鑫厅、张绪美、刘小平、迟延艳、刘佳慧等硕士研究生在野外实验及室内数据处理中给予的帮助

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: weiwangww@sina.com

2001;王跃思等,2000)微气象法和化学吸收法(李凌浩等,2002)等。

在本项研究中,我们以中温型典型草原为研究对象,开展了关于草原生态系统水分利用格局的测定工作。采用 LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪接气室的方法,同时测定了内蒙古锡林河流域典型草原区群落蒸散量与 CO₂ 交换量,并通过实际测定发现,该方法简便实用,将我们所关心的群落的两个问题——水分利用与碳固定——同时加以考虑,由于测定时间上的同步以及使用同一台测定仪器,因而极大地减少了系统误差,使测定精度得到提高;从测定的尺度上看,介于个体与区域之间,既解决了单个植株数据难以外推至大面积上的问题,又保证了区域尺度测定中难以保证的精确度问题;实验器材价格适中但精确度高,简便易携带,适于野外操作。综上所述,该方法不仅开拓了蒸散量研究的一个新途径,对于今后群落水平上水分利用格局与 CO₂ 固定的研究也提供了一个新途径。

1 样地选择

研究区位于内蒙古锡林河流域中游地区,行政区属锡林郭勒盟白音锡勒牧场。研究区的地理坐标大致为 43°26′ ~ 44°39′ N、115°32′ ~ 117°12′ E,海拔 900 ~ 1 500 m,属温带大陆性半干旱气候,主要土壤类型为暗栗钙土。该区域处于内蒙古高原中部的典型草原带内,主要群落类型包括:羊草(*Leymus chinensis*)群落、大针茅(*Stipa grandis*)群落、克氏针茅(*S. krylovii*)群落等。在上述研究区内,本实验选定中国科学院草原生态系统定位站设置的退化恢复样地(1983 年围封的恢复群落,测定时为羊草 + 大针茅群落)、退化新围封样地(1997 年从严重退化状态开始恢复,测定时处于从米氏冰草(*Agropyron michnoi*)建群向羊草建群的过渡状态),以及退化新围封样地外的重度退化群落等为研究对象。草本群落实验测定面积均为 1 m × 1 m。

2 测定方法

2.1 实验原理

在封闭的气室内经过一定时间,植物的光合、呼吸作用和土壤的呼吸作用会导致气室内大气 CO₂ 浓度发生变化。如果植物通过光合作用固定的 CO₂ 量大于植物自身呼吸和土壤呼吸所释放的 CO₂ 量,那么在一段时间间隔后,气室内的 CO₂ 浓度降低;反之,如果植物光合作用固定的 CO₂ 量小于植物自身

呼吸和土壤呼吸所释放的 CO₂ 量,则在一段时间间隔后,气室内的 CO₂ 浓度升高。气室内大气中水蒸汽的增量源于植物的蒸腾和土壤的蒸发,晴朗的天气里,在 SPAC 这个连续系统里,水分总是从植被和土壤进入到大气中去的。所以,封闭气室内的水汽浓度一直在增加。

LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪是用来测定大气中 CO₂、H₂O 浓度的红外气体分析仪,由于测定精度可达 0.01(CO₂ : μmol · mol⁻¹, H₂O : mmol · mol⁻¹),它可以灵敏地感应大气中 CO₂、H₂O 浓度的瞬时变化,并将当时大气中 CO₂、H₂O 的浓度值自动记录到计算机中。利用 LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪测定封闭气室内 CO₂、H₂O 浓度随时间的变化,在一段时间间隔内,CO₂、H₂O 初始浓度和终了浓度的差值即为这段时间内被测表面的 CO₂ 交换量(μmol · mol⁻¹)和蒸散量(mmol · mol⁻¹)。这就是本项实验所采用的方法,即 LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪接气室法测定群落的 CO₂ 交换量和蒸散量。

2.2 实验设计

草原群落的封闭气室是由 12 根长度为 1 m 的方形铁管作框,在其外罩上透明塑料薄膜制成容积为 1 m × 1 m × 1 m 的立方体。透明塑料薄膜的透光率较高,同时测定气室内外等高度处的照度值,表明气室的透光率为 86%。

群落 CO₂ 交换量和蒸散量日进程测定从早 7:00 开始到晚 19:00 结束,每隔 2 h 测定 1 次。测量时,气室与地面相接的四边插入预先挖好的土沟内,沟深 5 ~ 10 cm,用土封好,尽可能严密地封闭气室,以保证气室与外界没有气体交换。气室内装有 15 W 的小风扇,以保证气室内气体混合均匀,减小气室内的温室效应;在气室内外等高度处各放置一个照度计和温度计,同步测定气室内外的太阳辐射强度和气温。笔记本电脑与 LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪相连,系统会自动存储分析仪测定的 CO₂、H₂O 浓度,同时精确计时。本实验设定 LI-6262 CO₂/H₂O 分析仪每 10 s 读数 1 次,测定大约持续 3 min。同时每隔 50 s 记录 1 次照度计读数。测定结束后,立即将气室揭开,使测定对象恢复自然生长状态,以备下次继续测定,同时记录气室内外的气温。

2003 年生长季高峰期间(7 ~ 8 月)分别测定上述所有群落 CO₂ 交换量和蒸散量的日进程(2 次)和昼夜进程(1 次),监测不同群落类型 CO₂ 交换量和蒸散量的日动态和季节动态。

2.3 群落蒸散量与 CO₂ 交换量的计算方法

求取被测表面气体的通量 $F(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$ (周广胜和王玉辉 2003):

$$F = \Delta M / (S \times \Delta t) = (DV\Delta C) / (S \times \Delta t) = DH\Delta C / \Delta t$$

式中: ΔM 为时间间隔 Δt 内箱体内部被测气体质量的变化 (mg); S 为被测表面的箱体底面积 (m^2); D 为箱体内气体的密度, $D = P\mu / RT$, 且假定在时间间隔 Δt 内气体密度变化不大 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 其中 P 为箱内气压 (atm), 计算中认为 $P = 1 \text{ atm}$; μ 为摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), R 为气体普适常数 ($0.08206 \text{ atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T 为箱体外气温 (K), $T = 273.15 + t$; t 为箱体内气温 ($^{\circ}\text{C}$); h 为观测箱高度 (m); ΔC 为时间 Δt 内箱内被测气体浓度的变化 ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

$$F_{\text{CO}_2} (\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}) = 44 (\Delta C (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}) / 0.08206 (273.15 + t))$$

$$F_{\text{H}_2\text{O}} (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}) = 18 (\Delta C (\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}) / 0.08206 (273.15 + t))$$

2.4 数据处理

在 Excel、SPSS 统计软件下, 做基本的数据输入、计算和画图。

利用 Origin 统计、绘图软件, 对群落蒸散量、CO₂ 交换量随时间 (以 min 为单位) 的日变化做 Gauss 型或多峰 Gauss 型曲线拟合, 在 Matlab 计算软件下做曲线积分运算, 求出群落一天的蒸散量和 CO₂ 交换量。

3 结果与分析

3.1 气室内外气温差异分析

封闭气室中, 由于气室是由透光率达 86% 的塑料薄膜封闭制成, 地表和气室内的长波辐射受阻挡扩散不出去, 容易产生“温室效应”。一次测定 (3 min) 后, 气室内外温度如图 1 所示。在气温较低清晨、傍晚和夜间, 气室内外温度差别不大, 或者基本没有差别。如在凌晨 2:00 和 4:00 的时候, 气室内外温度相等; 在晚上 21:00 和 24:00 时, 气室内温度分别高出大气温度 0.1 和 0.4 $^{\circ}\text{C}$; 在傍晚 19:00 的时候, 气室内温度比大气温度高出 0.9 $^{\circ}\text{C}$ 。而在气温较高的白天, 气室内外的温差变大, 大概在 5~7 $^{\circ}\text{C}$; 在气温最高的上午 9:00 和下午 13:00, 气室内外的温差也达到了最大, 分别为 8.5 和 7.3 $^{\circ}\text{C}$ 。杜睿等 (2001) 用箱法在草地温室气体通量的野外实验观测中, 一般情况下, 箱内外气温差为: 夜间 1~2 $^{\circ}\text{C}$;

在晴朗的天气条件下, 白天上、下午及正午箱内的气温变化较大, 短时间内箱内气温可高出大气温度 14 $^{\circ}\text{C}$ 左右; 阴天或阴雨的情况下, 箱内外气温差一般不超过 4 $^{\circ}\text{C}$ 。与之相比, 本实验中温室效应的影响相对较小。究其原因: 一是测定时间相对较短 (3 min); 二是封闭气室所选材料为塑料薄膜, 对气室内外热交换的阻碍较小。

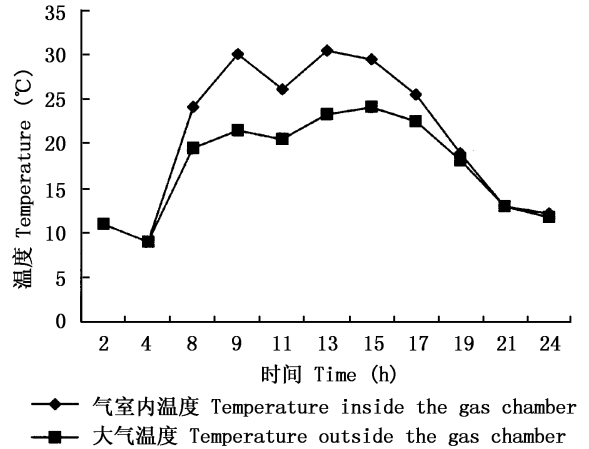


图1 气室内外温度对比

Fig. 1 Comparison of temperatures between the inside and the outside of gas chamber

3.2 利用此方法得到的退化样地群落蒸散量及 CO₂ 交换量日变化曲线 (图 2 和图 3) 及方程

$$y = 0.01695 + \frac{2242.96737}{321.03295 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{\frac{-2(x-780.95306)^2}{321.03295^2}} \quad (1)$$

$$y = -17.1061 + \frac{19677.64359}{426.09879 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{\frac{-2(x-588.19843)^2}{426.09879^2}} + \frac{7498.96737}{321.03295 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{\frac{-2(x-780.95306)^2}{321.03295^2}} \quad (2)$$

方程 (1) 中, x 为时间 (min); y 为瞬时蒸散量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$);

方程 (2) 中, x 为时间 (min); y 为瞬时 CO₂ 交换量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)。

4 结论与讨论

LI-6262 CO₂/H₂O 红外气体分析仪连接气室测定群落 CO₂ 交换量和蒸散量方法的缺点是测定环境受人为干扰, 与自然状态不完全相同, 例如自然环境中风的作用被完全消除, 气室内的“温室效应”使得

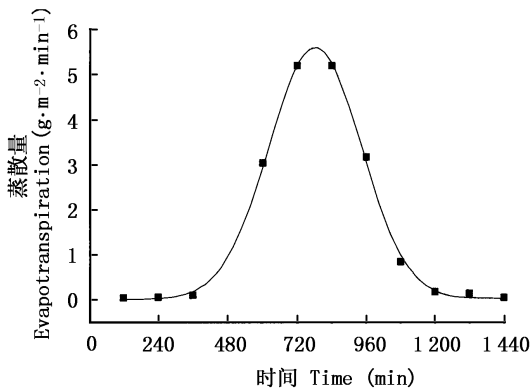
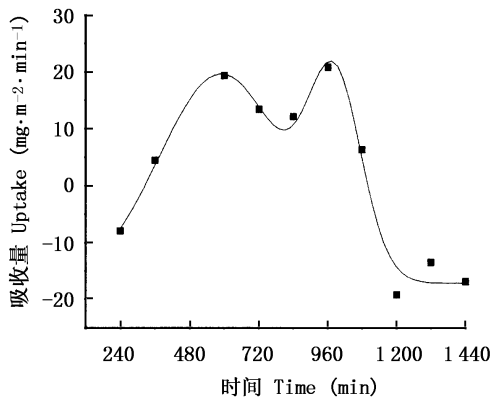


图2 退化样地群落7月13日蒸散量日变化

Fig.2 Diurnal variation of evapotranspiration in the plot of degenerative community on 13th, July

图3 退化样地群落7月13日CO₂吸收量日变化Fig.3 Diurnal variation of CO₂ absorption in the plot of degenerative community on 13th, July

在晴朗白天测定时气室内气温高出气室外大约 5 ~ 7 °C ;实验罩箱时挖的土沟可能使土壤缝隙内的 CO₂ 释放量增加 ,会影响对植被 CO₂ 交换量的估测。在实际工作中宜根据实验目的 ,合理设计实验 ,尽量减少由于上述原因所引起的误差。比如说 ,在高温条件下 ,可将罩箱时间减少至 1.5 ~ 2.0 min ,通过减少罩箱时间来减小实验误差 ,而在这样的时间间隔内依然可以得到 CO₂ 交换量和蒸散量随时间变化的规范曲线。

根据研究的需要 ,我们还可以在此基础上对该方法进行改进。由于 LI-6262 CO₂/H₂O 红外气体分析仪连接气室法直接测定的是 CO₂、H₂O 的气体通量 ,尚不能将植物蒸腾、土壤蒸发以及植物净光合和土壤呼吸区分开来 ,在进一步研究中 ,可以考虑剪掉被测样点的地上植物 ,同步测定有植被覆盖和没有植被覆盖的样点的气体通量 ,这样就可以得到植物蒸腾、土壤蒸发以及植物净光合、土壤呼吸等一系列

表征群落性质的数据。

该方法可同步测定群落 CO₂ 和 H₂O 通量 ,将群落的两个重要生态过程 蒸散与光合、呼吸作用的测定联系起来 ,据此可以得到一系列表征群落特性的有用指标 ,如水分利用效率等 ,从而发现了一些由于实验手段的局限而忽略了的问题。此外 ,群落 CO₂/H₂O 测定是区域整合的基本单位 ,借助个体或器官测定值进行的区域整合随机性太大 ,这种随机性体现在植物蒸腾耗水量主要受其绿色部分产量和蒸腾强度的制约 ,而植物的产量和蒸腾强度很大程度上取决于气象条件和土壤水分。植物的产量在不同的水分条件下相差可达一倍多(李博等,1964),而同一区域内土壤水分含量因受地形、坡度、坡向等局部生境差异的影响而难以定量估算其变化率。个体或器官水平上的测定 ,整合时需经由叶片→植株→群落→区域的整合过程 ,在此过程中 ,叶片大小、叶片的着生位置、叶龄、单位叶片重量的变化率、单个植株叶片数量的变化率、群落中的植株空间分布的非各向同性及种群空间聚块的客观存在等因素 ,会将整合过程中的误差累积起来 ,导致整合至群落水平时 ,误差已经很大。尽管目前定量估计这些累积误差还存在困难(如能够估计这些累积误差 ,则有可能进行整合) ,但至少可以确定 ,整合环节越少 ,整合精度越高。从群落为基点的整合 ,到达一个如本文研究的区域只有一个环节 ,如果从叶片开始整合 ,中间环节可能接近于“不计其数”。因此个体水平及以下的测定不足以反映区域的情况 ,只有群落水平的测定才是区域整合的基本单位。从这个意义上讲 ,该方法开辟了一个用于区域 CO₂/H₂O 通量测定的新途径。需要指出的是 ,对于陆地生态系统而言 ,涡度相关法是目前推测通量最直接的方法 ,也是推算碳素和水分收支中最为迅速的一种方法。要求的是对有关物理量的精确和高速的测定 ,需要精度高、反应快的仪器 ,已有学者利用该方法作气体通量的测定(徐玲玲等 2005 ;李彦等 ,2004)。但是 ,涡度相关测定需要借助的涡流模型以其非线性而取近似 ,故在测定精度上与本文介绍的方法要通过比较才能确定。

由于实验仪器及器材具有便携、适于野外操作的特点 ,因此将我们在典型草原区获得的实验方法略作改进 ,可广泛应用于草原、沙地及湿地植物群落气体通量的测定。对于精确研究草原区各种群落类型的水分、光合和呼吸特性及草原区植被在全球变化中的地位和作用有重要的实用价值。

参 考 文 献

- Du R (杜睿), Wang GC (王庚辰), Li DR (吕达仁), Kong QX (孔琴心), Liu GR (刘广仁), Wan XW (万小伟), Zhang B (张斌), Wang YF (王艳芬), Ji BM (季保明) (2001). A study of chamber method for in-site measurements of greenhouse gas emissions from grassland. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), 25, 61 – 70. (in Chinese with English abstract)
- Li B (李博), Zeng SD (曾泗弟), Hao GY (郝广勇) (1964). A pilot study on the water-ecology for the *Aneulepidium chinensis* bunch grass community of the steppe area in the Hulun Beir League, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学丛刊), 2, 129 – 140. (in Chinese with English abstract)
- Li Y (李彦), Wang QX (王勤学), Ma J (马健), Watanabe Masataka, Zhang XL (张小雷) (2004). Water, heat and CO₂ transfer over a salinized desert in the arid area. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 59, 33 – 39. (in Chinese with English abstract)
- Li LH (李凌浩), Han XG (韩兴国), Wang QB (王其兵), Chen QS (陈全胜), Zhang Y (张焱), Yang J (杨晶), Bai WM (白文明), Song SH (宋世环), Xing XR (邢雪荣), Zhang SM (张淑敏) (2002). Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River Basin. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 26, 29 – 32. (in Chinese with English abstract)
- Wang AZ (王安志), Pei TF (裴铁璠) (2001). Research progress on surveying and calculation of forest evapotranspiration and its prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 12, 933 – 937. (in Chinese with English abstract)
- Wang YS (王跃思), Wang YF (王艳芬), Liu GR (刘广仁), Ji BM (纪宝明), Zhang W (张文), Du R (杜睿), Luo DM (骆冬梅) (2000). Measurement of the exchange rate of greenhouse gases between field and atmosphere in semi-arid grassland. *Environmental Science* (环境科学), 21(3), 6 – 10. (in Chinese with English abstract)
- Xu LL (徐玲玲), Zhang XZ (张宪洲), Shi PL (石培礼), Yu GR (于贵瑞), Sun XM (孙小敏) (2005). Net ecosystem carbon dioxide exchange of alpine meadow in the Tibetan Plateau from August to October. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 1948 – 1952. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS (周广胜), Wang YH (王玉辉) (2003). *Global Ecology* (全球生态学). China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese)

责任编辑:周广胜 责任编辑:刘丽娟