

克氏针茅草原生态系统生长季碳通量变化特征

薛红喜¹, 李 琪², 王云龙², 吴东丽^{3,4}

(1.中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 2.南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3.中国气象科学研究院, 北京 100081; 4.国家气候中心, 北京 100081)

摘 要:植被和大气之间 CO₂ 通量的观测有助于理解陆地生态系统的碳循环及其控制机理。以中国北方典型草原克氏针茅草原为研究对象,以涡度相关法为主要技术手段,探讨了 2008 年生长季内克氏针茅草原净生态系统碳交换(NEE)的变化特征。结果表明,克氏针茅草原生态系统 CO₂ 通量的日变化进程可以依据高峰出现的时间分为两种,一种具有一个吸收高峰,出现在 11:00 左右,另一种则具有两个吸收高峰,在正午前后出现碳释放现象。2008 年克氏针茅草原生态系统最大的 CO₂ 吸收速率为 $-0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。克氏针茅草原在 4 月和 10 月的 NEE 昼夜变化比较平缓,在 5—9 月日间 CO₂ 吸收量和夜间 CO₂ 排放量都开始增大,出现了明显的 CO₂ 日吸收峰值,但各月的日动态格局差异较大。2008 年生长季中 7—9 月白天碳吸收活动最强,6—9 月夜间 CO₂ 释放量较大。克氏针茅草原碳通量日累积量在 2008 年出现了 3 个明显的碳吸收峰;NEE 的日最大累积吸收量和最大累积释放量分别为 -2.38 和 $1.47 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,并且出现在植被生长最旺盛的 7、8 月份。研究表明,温度和水分是影响克氏针茅草原生态系统碳通量变化的重要因子。

关键词:克氏针茅草原;碳通量;生长季;变化;涡度相关

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)08-1742-06

Variation of Net Ecosystem Carbon Flux Exchange Over *Stipa krylovii* steppe in the Growing Season

XUE Hong-xi¹, LI Qi², WANG Yun-long², WU Dong-li^{3,4}

(1. Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China; 2. Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 4. National Climate Center of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Long-term measurement of the CO₂ fluxes between the vegetation and the atmosphere has facilitated the research on carbon cycle in terrestrial ecosystems and its controlling mechanism. Based on the eddy covariance measured CO₂ fluxes at the *Stipa krylovii* ecosystem in northern China, the variation of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in growing season in 2008 was discussed. The results indicated that there had two different CO₂ flux daily patterns at the *Stipa krylovii* ecosystem. One had a single uptake peak with the maximum CO₂ uptake peak around 11:00, and the other had a dual peak in daily course of CO₂ fluxes with CO₂ emission before and after noon. The maximum CO₂ uptake rate was $-0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in 2008, which was in the low level contrasted with the values of other grasslands. The variation of NEE in April and October had small ranges, and the uptake and emission values of CO₂ began to increase from May to September with obvious CO₂ uptake peak. In 2008, there had the strongest daytime uptake from July to September and the strongest nighttime emission happened from June to September. With the rise of the temperature and the more rainfall, the *Stipa krylovii* ecosystem shows the characteristic of carbon sink. There have three obvious uptake peak of daily integrated NEE for *Stipa krylovii* ecosystem in 2008. Daily integrated NEE reached its uptake and emission peak magnitude of $-2.38 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ and $1.47 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ respectively in July and August when the plant was in vigorous growth period. The research shows that the temperature and the moisture, but not limited to, are the most important factors to impact the variation of net ecosystem carbon flux exchange over *Stipa krylovii* steppe.

Keywords: *Stipa krylovii* steppe; carbon flux; growing season; variation; eddy covariance

收稿日期:2009-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40605029 和 30771248);国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2006BAD04B09);
南京信息工程大学科研启动项目(20080264)

作者简介:薛红喜(1978—),男,山西河津人,博士,工程师,主要从事农业气象、大气探测研究工作。E-mail: xue-hongxi@163.com

通讯作者:李 琪 E-mail: liqix123@sina.com

草原是分布最广的陆地生态系统,也是陆地-大气之间碳、能量和水分交换重要的生态系统^[1],草原生态系统参与了包括陆地生态系统在内的全球碳循环过程并起着重要作用^[2]。与其他生态系统类型相比,草原生态系统表现出较大的年际间总生产力的波动,这使得在确定草原生态系统作为碳源或碳汇方面存在较大的不确定性^[3-5]。目前草原生态系统也是人类活动影响最为严重的区域,其碳素行为很活跃,具有相当大的碳蓄积能力,这些潜在碳汇在全球碳循环中起着很大的作用^[2]。因此,对草原生态系统碳循环主要过程及其影响机理的研究是研究全球碳循环问题的关键之一^[6-7]。

锡林郭勒草原是欧亚大草原的重要组成部分,是我国北方保持最完整、最具代表性的典型草原,也是中国气候观测系统(CCOS)建议的中国气候多圈层综合监测16个关键区之一。克氏针茅草原在我国北方有广泛的分布,是该区域内典型草原的代表群系之一,是内蒙古重要的草地资源,在畜牧业生产中占有重要地位。尽管有学者对克氏针茅草原生态系统进行了相关研究^[8-9],但其对区域碳循环的贡献机理仍不明确,生态系统结构、环境因子等与碳交换之间的控制机制还需要进一步研究。涡度相关技术是一种对CO₂、H₂O和热量进行非破坏性测定的微气象技术^[10]。近年来涡度相关技术的进步使得长期的定位观测成为可能^[11-13]。目前,涡度相关技术已经广泛应用于陆地生态系统CO₂吸收与排放的测定中^[14-17],也是世界上CO₂和水热通量测定的标准方法,所观测的数据已经成为检验各种模型估算精度的权威资料。为了深入研究草原生态系统碳循环过程及其与环境因子之间的影响和响应机制,中国气象局从2007年6月开始利用涡度相关技术对锡林浩特克氏针茅草原进行长期观测,本文是这一研究过程中的初步结论,希望能为克氏针茅草原生态系统碳收支估算和相关碳模型参数修正提供参考。

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区域自然概况

研究地点(44°08'31"N, 116°18'45"E)位于内蒙古锡林浩特市东北的国家气候观象台站内,海拔大约1160 m,下垫面开阔平坦。该观象台位于锡林郭勒草原中心,是典型的草原生态区,在国家气候观象台综合布局中属于草地观测区。该区属中温带半干旱气候类型,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,太阳辐射较强。

研究区年平均气温2.6℃,年平均降水量约280 mm,且主要集中在6—9月。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

通量观测系统为开路式涡度相关系统,主要由开路式CO₂/H₂O分析仪(CS7500, LI-COR, USA)、超声风速仪(CSAT-3, Campbell, USA)和数据采集器(CR3000, Campbell, USA)组成。观测仪器安装在4 m高度,测量植被与大气间的通量交换,采样频率为10 Hz,同时在线计算30 min通量及其他各种必要的协方差并把结果存储在数据采集器内。按照微气象学符号协定,净生态系统CO₂交换(NEE)向下通量(即碳吸收)用负号表示。

微气象观测系统主要包括:辐射(CNR-1, Kipp & Zonen, The Netherlands)、光合有效辐射(LI-190SB, LI-COR, USA)监测,辐射探头安装高度为2 m;2、4、10、20、32 m处的空气温/湿度(HMP45C, Campbell, USA)、风速(Model010C, Campbell, USA)以及2 m处风向(Model020C, Campbell, USA)监测。

其他相关环境要素如温度、相对湿度、降雨量、土壤温度(5、10、15、20、40 cm)、土壤湿度(10、20、50、100、180 cm)等也同时监测。

1.2.2 数据分析与处理

本文选取了2008年克氏针茅草原生态系统主要生长季(4—10月)的碳通量和相关数据进行研究,为确保数据的准确性,我们对涡动相关系统的半小时通量数据进行了3次坐标旋转和WPL密度效应修正^[18],对由于降雨、系统故障等因素造成的数据丢失进行了剔除。为了消除夜间低湍流的影响,以夜间摩擦风速 $>0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为标准对数据进行了筛选^[19]。经过数据筛选和剔除异常点后,白天的碳通量利用光响应曲线进行插补^[20];夜间当摩擦速度 $>0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,碳通量采用指数关系插补^[19]。

2 结果与讨论

2.1 克氏针茅草原碳通量的日动态

克氏针茅草原生态系统在生长季的夜间NEE为正值,表现为生态系统碳排放,白天日出后,光合有效辐射(PAR)达到一定数值后NEE转为负值,表现为碳吸收,但随着PAR的增加,NEE却表现出不同的变化特征。本文采用7 d的平均值来分析克氏针茅草原碳通量的日变化特征。以碳通量吸收高峰出现的时间特征为依据,可以把2008年生长季中克氏针茅草原

生态系统 CO_2 通量的日进程分为两类不同的类型:一种是生态系统碳通量只有一个吸收高峰(图1-a),即日出后(6:00 左右)生态系统开始吸收 CO_2 , NEE 随着 PAR 的增加迅速增大, 11:00 左右到达吸收高峰后, CO_2 的吸收开始下降, 19:00 以后重新转为碳释放。另一种是生态系统碳通量具有两个吸收高峰(图1-b), 即 7:30 以后克氏针茅草原开始吸收 CO_2 , 9:30 左右达到第一个吸收高峰后, 很快转变为释放 CO_2 (正午前后), 13:00 以后又快速转变为吸收 CO_2 , 并在

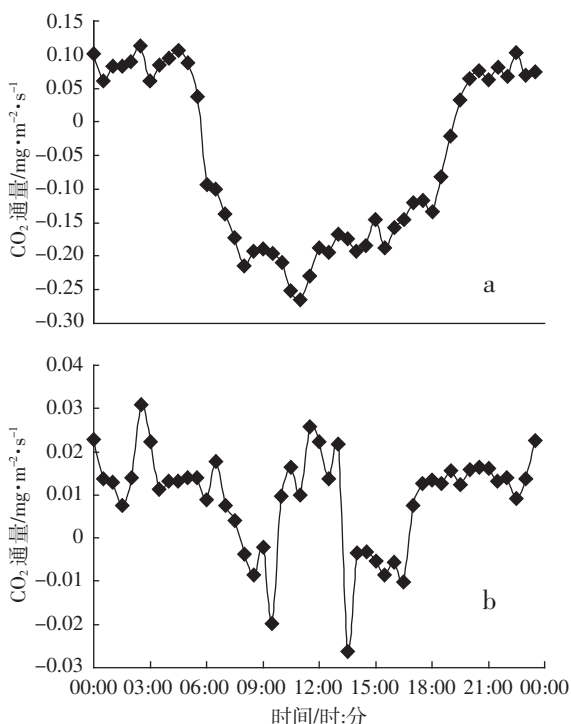
13:30 左右达到第二个吸收高峰, 之后碳通量开始下降, 大约在 17:00 左右生态系统开始向大气排放 CO_2 。

在生长季的大部分时间里, 克氏针茅草原生态系统的碳通量变化都表现出单吸收峰的特征, 而双吸收峰的特征主要发生在生长季的后期(10 月份以后)。杨娟等^[9]对克氏针茅草原 2004 年碳通量的研究仅得出了单吸收峰的特征, 且开始吸收 CO_2 、达到吸收高峰以及再转变为释放 CO_2 的时间基本一致; 郝彦宾等^[21]对羊草草原碳交换的研究则得到了与本研究相似的单、双两类碳吸收峰类型, 但碳通量到达峰值时间不同。对于单峰型而言, 羊草草原碳吸收峰值出现在 8:00—9:00, 而克氏针茅草原碳吸收峰值出现的时间较晚(11:00 左右); 对双峰型而言, 羊草草原到达两次碳吸收峰值的时间分别为 8:00—10:00 和 15:00 左右, 而克氏针茅草原分别在 9:30 和 13:30 左右, 第二次峰值出现的时间要早于羊草草原。

2008 年克氏针茅草原生态系统生长季内最大的 CO_2 吸收速率为 $-0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与其他类型的草原生态系统相比, 克氏针茅草原生态系统的最大碳吸收值高于新西兰的丛生草原 ($-0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和青海三江源区的人工草地 ($-0.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 低于内蒙古的羊草草原 ($-0.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和美国堪萨斯州高草草原 ($1.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[22-25]。

2.2 克氏针茅草原碳通量的月均日动态

克氏针茅草原生态系统 NEE 的月平均日变化具有明显的季节动态, 不同月份的 NEE 的日变化格局也存在明显差异。从图 2 可以看出, 无论是白天还是夜晚, 克氏针茅草原在 4 月和 10 月两个月份的 NEE 在量值上都相对较小, 昼夜变化比较平缓; 在 5—9 月, 随着气温的升高和降水量的增加(土壤水分的增加),



a. 2008 年 7 月 5—11 日平均值; b. 2008 年 10 月 4—10 日平均值

图 1 克氏针茅草原生长季碳通量日变化

Figure 1 Date change of net ecosystem carbon flux exchange over *Stipa krylovii* steppe in the growing season

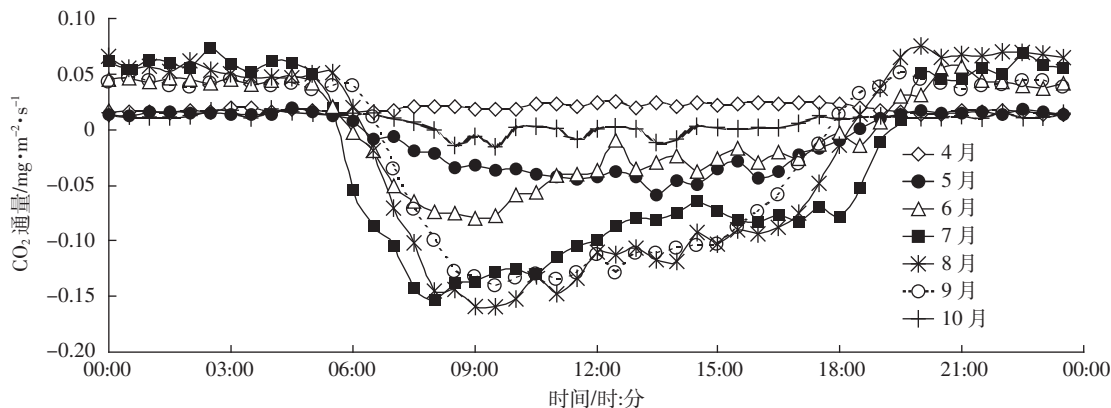


图 2 克氏针茅草原碳通量的月均日变化

Figure 2 Average date change in one month of net ecosystem carbon flux exchange over *Stipa krylovii* steppe in the growing season

适宜的生长条件使植物的地上生物量迅速积累,植物日间 CO_2 吸收量和夜间 CO_2 排放量都开始增大,出现了明显的 CO_2 日吸收峰值,碳通量的日变化呈 U 型曲线。师广旭等^[26]的研究表明,克氏针茅草原土壤呼吸的日季动态变化也呈单峰型,且不同月份也有较大差异。这样在土壤呼吸和植物生长的共同作用下,克氏针茅草原生态系统碳通量各月的日动态格局也存在较大差异。

克氏针茅草原通常在 4 月下旬才进入生长季,但由于此阶段温度较低、降雨很少,植物的生长活动很弱,而土壤呼吸释放 CO_2 较多,再加上前期对碳吸收值的抵消,所以整个生态系统在 4 月份的全天都表现出碳排放的特征。5 月份后克氏针茅草原植被开始返青,系统在白天的大部分时间里 CO_2 通量都为负值(碳吸收),但同样受干旱和温度的限制,系统白天的碳吸收活动较弱,峰值较低。6 月份的雨量和温度继续增加,干旱胁迫减弱,所以白天的碳吸收峰值有所增强。进入 7、8、9 月份,土壤水分不再成为光合作用的限制因子,良好的温度、水分条件和活跃的植物根系活动同时促进系统呼吸,尽管土壤呼吸也要释放大量的 CO_2 ,但由于植物生长旺盛,此阶段的碳吸收活动最强,NEE 形成宽大的单峰曲线。10 月份后,草原进入生长季的末期,叶片逐渐衰老枯萎,虽然还有一定的光合现象,但较微弱,再加上强烈的土壤呼吸,所以系统碳吸收活动很弱,整体表现为碳的排放活动。

同样的,夜间 CO_2 释放量也是 6—9 月较高,4、5 和 10 月份较低。6—9 月不但土壤呼吸强度随着温度和水分的增加而增强,从而释放出更多的 CO_2 ,同时植物的呼吸作用也随着生长的旺盛而增强,所以这一时期系统在夜间会排放更多的 CO_2 。

2008 年克氏针茅草原生态系统生长季碳通量的月均最小值(最大固碳量)和最大值(最大碳排放量)都出现在 8 月,分别为 -0.16 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明克氏针茅草原生态系统在 8 月份日间的碳固定和夜间的碳释放活动都较强。与其他草原生态系统相比,克氏针茅草原生态系统碳通量的最小和最大值与内蒙古羊草草原(最小、最大值分别为 -0.16 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[27]的相近,而明显小于北美的以 C4 植物为主的大草原,如美国曼哈顿市附近的一种大须芒草草原以及美国俄克拉荷马州地区的高草草原(最小、最大值分别是 -1.4 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 -1.1 和 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[28-29]。这说明除了光照、温度、水分等环境因素外,植物的种类也是影响草原生态系统光合作用的因

素,以 C3 植物为主的克氏针茅草原生态系统碳通量的特征参数处于较低的水平。

2.3 克氏针茅草原碳通量日总量的季节动态

与其他草原生态系统一样,克氏针茅生态系统 NEE 的变化是受土壤释放和植被对 CO_2 吸收影响共同作用的结果。因植被类型及所处的环境不同,导致土壤微生物分解、土壤呼吸、植被的光合作用以及各种环境因子季节变化的差异,进而会影响到 NEE 的季节动态特征。本文把每日每半小时的通量进行积分求出生态系统每日的净 CO_2 累积交换量,并分析其季节变化特征(图 3)。研究发现,在 2008 年生长季期间,克氏针茅草原生态系统主要出现了 3 个明显的碳吸收峰,4 月 30 日至 5 月 22 日的吸收峰较小且时间较短,6 月 23 日至 7 月 20 日以及 8 月 9 日至 9 月 20 日的吸收峰较强且持续时间较长。在生长季的其他时间里,克氏针茅草原生态系统整体表现为碳源。与杨娟等在 2004 年的研究结论相比,多出了一个 6 月 23 日至 7 月 20 日的碳吸收峰,其主要原因是 2008 年这一时期的雨量较多,植被的生长没有受到水分因子的制约,所以克氏针茅草原生态系统在这一时期也表现为一个较强的碳汇。

从图 3 可以看出,2008 年克氏针茅草原生态系统 NEE 的日最大累积吸收量出现在 7 月 5 日(187 d),可达 $-2.38 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,NEE 的日最大累积释放量为 $1.47 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,出现在 8 月 4 日(217 d)。这说明在 7、8 月份,该地区的水热条件适宜,植物生物量迅速累积,植物的光合作用和呼吸作用都比较旺盛;同时较高的土壤温度和湿度也增强了土壤微生物的代谢活动,土壤有机质的分解加速,因而 NEE 的日最大累计值都出现在这一时期。

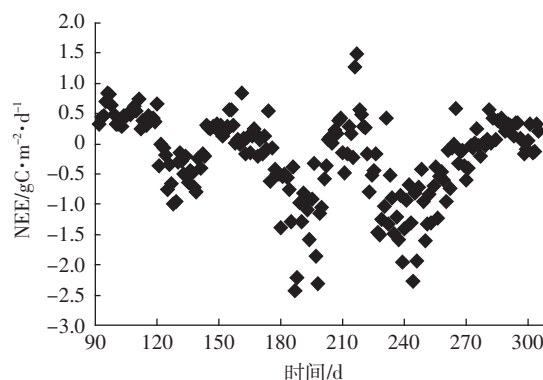


图 3 克氏针茅草原碳通量日总量的季节变化

Figure 3 Season change of day total net ecosystem carbon flux exchange over *Stipa krylovii* steppe in the growing season

3 结论

草地生态系统与大气间的物质和通量交换过程在当前全球碳循环研究领域占据非常重要的地位。克氏针茅草原是全球典型的中纬度半干旱温带草地生态类型。本文利用涡度相关技术观测了克氏针茅草原生态系统与大气之间的 NEE, 分析了 2008 年生长季内 NEE 的日变化、月均日变化以及季节变化的特征, 结果表明:

2008 年生长季中克氏针茅草原生态系统 NEE 的日进程分为单峰和双峰两类不同的类型, 其中双峰型在杨娟等^[9]的研究中没有出现; 2008 年最大的 CO_2 吸收速率为 $-0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与其他草地类型相比, 该值处于较低的水平;

NEE 的月均日变化特征显示, 克氏针茅草原在 4 月和 10 月的 NEE 昼夜变化比较平缓, 5—9 月日间 CO_2 吸收量和夜间 CO_2 排放量都开始增大, 出现了明显的 CO_2 日吸收峰值。2008 年中 7—9 月白天碳吸收活动最强, 6—9 月夜间 CO_2 释放量较大; NEE 的月均最小值和最大值都出现在 8 月, 分别为 -0.16 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 说明随着温度的升高和降水的增多, 植物的生长和土壤的呼吸作用都达到了最强, 只要环境条件适宜, 克氏针茅草原生态系统就能表现出碳汇的特性;

在 2008 年生长季期间, 克氏针茅草原生态系统的日净 CO_2 累积交换量出现了 3 个明显的碳吸收峰, 而出现碳释放的原因主要是水分的亏缺。在生长季内, 由于光照、温度等条件较适宜, 水分因子就成为克氏针茅草原生态系统碳源/汇转化的限制因子, 在干旱的条件下, 生态系统由碳汇向碳源转变。在未来全球气候变化的前提下, 克氏针茅草原分布区内的降雨量、降雨强度以及时空分配格局都会发生变化, 而这些因素都会影响到草原生态系统的 NEE, 因此克氏针茅草原生态系统 NEE 与降雨之间的影响和响应机制还有待深入研究。

参考文献:

- [1] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, et al. Evapo-transpiration and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 11: 65–82.
- [2] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳循环研究进展[J]. 草地学报, 2005, 13(增刊): 67–73.
- [3] ZHONG Hua-ping, FAN Jiang-wen, YU Gui-rui, et al. Progress of carbon cycle research in grassland ecosystem[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(Suppl.): 67–73.
- [4] Frank A B, Dugas W A. Carbon dioxide fluxes over a northern, semiarid, mixed-grass prairie[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 317–326.
- [5] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystem: past, present and future[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479–492.
- [6] Kjelgaard J F, Heilman J L, McInnes K J, et al. Carbon dioxide exchange in a subtropical, mixed C₃/C₄ grassland on the Edwards Plateau, Texas[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 48: 953–963.
- [7] Ojima D S, Dirk B O M, Gleovn E P, et al. Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world[J]. *Water Air Soil Pollut*, 1993, 70: 95–109.
- [8] 耿元波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74–81.
- [9] GENG Yuan-bo, DONG Yun-she, QI Yu-chun. Review about the carbon cycle researches in grassland ecosystem[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(3): 74–81.
- [10] 王云龙. 克氏针茅草原的碳通量与碳收支[D]. 北京: 中国科学院, 2008.
- [11] WANG Yun-long. Flux and balance of payments of carbon over *Stipa krylovii* steppe[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [12] 杨娟, 周广胜, 王云龙, 等. 内蒙古克氏针茅草原生态系统——大气通量交换特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 533–538.
- [13] YANG Juan, ZHOU Guang-sheng, WANG Yun-long, et al. Characteristics of net ecosystem flux exchanges over *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 533–538.
- [14] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T T. Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micro meteorologically methods[J]. *Ecology*, 1988, 69: 1331–1340.
- [15] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO_2 and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183–197.
- [16] Falge E, Tenhunen J, Dennis B, et al. Phase and amplitude of ecosystem carbon release and uptake potentials as derived from FLUXNET measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 75–95.
- [17] Gilmanov T G, Soussana J F, Aires L, et al. Partitioning European grassland net ecosystem CO_2 exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 121: 93–120.
- [18] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 97–120.
- [19] Ciais P, Reichstein M, Niovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J]. *Nature*, 2005, 437: 529–533.
- [20] Fu Y L, Yu G R, Sun X M, et al. Depression of net ecosystem CO_2 exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe and alpine shrub[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 234–244.
- [21] Grace J, S. Jose J, Meir P, et al. Productivity and carbon fluxes of tropi-

- cal savannas[J]. *Journal of Biogeography*, 2006, 33:387–400.
- [18] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106:85–100.
- [19] Xu L K, Baldocchi D B. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123:79–96.
- [20] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107:43–69.
- [21] 郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏, 等. 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, 36(增刊 I):174–182.
- HAO Yan-bin, WANG Yan-fen, SUN Xiao-min, et al. Season variability and eco-analysis of carbon exchange over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2006, 36 (Suppl. I):174–182.
- [22] Kim J, Verma S B. Carbon dioxide exchange in a temperate grassland ecosystem[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 52:135–149.
- [23] Dugas W A, Heuer M L, Mayeux H S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie and sorghum[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93:121–139.
- [24] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- YU Gui-rui, SUN Xiao-min. Carbon flux observation techniques and temporal and spatial characteristics on terrestrial ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [25] 赵 亮, 古 松, 周华坤, 等. 青海省三江源区人工草地生态系统 CO₂ 通量[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3):544–554.
- ZHAO Liang, GU Song, ZHOU Hua-kun, et al. CO₂ fluxes of artificial grassland in the source region of the three rivers on the Qinghai-tibetan plateau, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3):544–554.
- [26] 师广旭, 耿浩林, 王云龙, 等. 克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原土壤呼吸及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, 28(7):3408–3416.
- SHI Guang-xu, GENG Hao-lin, WANG Yun-long, et al. Daily and seasonal dynamics of soil respiration and their environmental controlling factors in *Stipa krylovii* steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (7):3408–3416.
- [27] Li S G, Asanuma J, Eugster W. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11:1–15.
- [28] Ham J M, Knapp A K. Fluxes of CO₂, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89:1–14.
- [29] Suyker A E, Verma S B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7:279–289.