

白美兰,孟玉婧,董祝雷,等. 内蒙古地区典型草原下垫面 CO₂ 通量变化特征及影响因素[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 212-218. [BAI Meilan, MENG Yujing, DONG Zhulei, et al. Variation Characteristics of CO₂ Flux and Its Influence Factors in Typical Grassland Area of Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(2): 212-218], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0212

内蒙古地区典型草原下垫面 CO₂ 通量 变化特征及影响因素

白美兰, 孟玉婧, 董祝雷, 李喜仓

(内蒙古自治区气候中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:基于内蒙古典型草原腹地锡林浩特国家气候观测台 2007—2016 年 CO₂ 通量逐 30 min 观测数据及同时段气温、降水等资料,利用 WPL 方法对 CO₂ 通量资料进行修正的基础上,对典型草原牧草不同时期 CO₂ 通量的变化特征及影响因素进行统计分析。结果表明:(1)内蒙古典型草原 CO₂ 通量存在明显的年际、季节和日变化特征,且表现为碳汇特征,尤以牧草生长季最为明显;CO₂ 通量呈夜间弱排放、白天强吸收的“U”型日变化,其中 09:00—10:00 最大;全年及生长季 CO₂ 通量以吸收为主,夏季吸收最大,春季和秋季次之,冬季最小,甚至表现为弱排放。(2)牧草不同生长期气候要素对 CO₂ 通量影响不同,其中返青期热量因子与 CO₂ 通量呈负相关,水分因子为正贡献;开花期和枯黄期正相反,热量因子对 CO₂ 通量为正贡献,水分因子为负贡献,且开花期热量与水分因子对 CO₂ 通量贡献最显著。(3)生长季牧草 NDVI 与 CO₂ 通量表现为负相关,且 7、8 月二者的相关性极高。

关键词:典型草原;CO₂ 通量;变化特征;碳汇;影响因素

文章编号:1006-7639(2018)02-0212-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0212

中图分类号:P404

文献标志码:A

引言

自 18 世纪以来,因人类活动排放的 CO₂ 等温室气体引起的气候变化已成为关注的热点^[1-3]。因此,在积极开发新能源和节能减排的同时,了解各生态系统对温室气体的反馈作用也是气候研究的重要内容。目前碳循环研究的重点是探讨排放的 CO₂ 如何在地球三大主要碳库(大气、海洋和陆地植被)中分配,然而由于陆地上生物地球化学循环过程的复杂性、观测时空尺度不均匀性等造成对陆地植被储碳能力的了解仍不足^[4]。

草地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分参与了全球碳循环过程,对全球气候变化具有重大影响^[5-6]。针对草地 CO₂ 呼吸方面的研究,国际上多集中于北美的温带草原以及部分印度的热带草原和澳大利亚的热带草原等^[7-13],而对于欧亚大陆温带干旱、半干旱草地涉及较少。近年来,我国虽然在内蒙古温带半干旱草原进行了一些分析研究^[14-17],但

由于所用方法不同,且试验观测资料较短(往往是 1~2 a 资料),很难表征当地真实气候特征。此外,有些试验年份正好处于草原的干旱年份或高温年份,代表性较差,影响了结论的可靠性及通用性。草地生态系统结构较为单一,生态功能相对脆弱,对环境的响应能力较强,随着环境的变化波动较大,其碳源/碳汇特征受气候条件变化影响较大。针对目前相关研究现状,本文选用内蒙古典型草原腹地锡林浩特观测站 2007—2016 年近 10 a 逐 30 min 长时间序列 CO₂ 通量观测资料,分析典型草原区 CO₂ 通量的时间变化特征及影响因素,以期为区域气候变化及碳储存研究提供基础依据。

1 资料与方法

1.1 资料与研究区概况

选用内蒙古锡林浩特国家气候观测台 2007 年 5 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日 CO₂ 通量资料,数据

收稿日期:2017-10-24;改回日期:2017-12-13

基金项目:地方财政专项“内蒙古适应气候变化战略研究”和“全区气候服务创新团队”共同资助

作者简介:白美兰(1963—),女,正研级高级工程师,硕士,研究方向为气候变化及影响评估。E-mail:nmgshrq@sina.com。

采集使用开路涡度相关通量监测系统。该系统由 CS7500CO₂/H₂O 分析仪 (Li - COR, USA)、CR1000 数据采集器 (Campbell, USA)、和 1 个 1 GB 的 PC 卡组成。CS7500CO₂/H₂O 分析仪, 测量 CO₂、风速和水汽等脉动量; CR1000 数据采集器, 主要是测控、运算及自动存储 30 min 原始数据。同时, 收集了同时段锡林浩特地区主要牧草返青期物候观测资料、植被指数 (NDVI) 及气温、降水量、日照时数、地温等气象数据, 并对相关资料进行质量检验等预处理。

锡林浩特观测站 (44°8'31"N、116°18'45"E) 地处典型草原腹地, 位于国际地圈 - 生物圈计划 (international geosphere - biosphere program, IGBP) 的国际样带中国东北温带森林 - 草原样带 (the

Northeast China transect, NECT) 内, 其动力、热力作用以及各物质通量对中国北方气候影响重大^[18]。该区域是具有大风、少雨、寒冷为主要特征的温带半干旱大陆性草原气候, 年平均气温 0 ~ 3 °C, 年平均降水量 200 ~ 350 mm, 气候要素年际波动较大。观测场占地 10 hm², 其周围无高大建筑物, 受人类活动扰动较小, 其生态系统基本取决于自然气候条件, 雨水充沛时牧草生长茂盛, 而少雨干旱时牧草干枯矮小。观测场周围是分布均一的典型针茅草场, 草丛平均高 30 ~ 50 cm, 且方圆 60 hm² 禁止放牧, 草原原始面貌保存较好 (图 1), 在气候、植被、动物和土壤等方面, 不仅在中国温带草原区具有较强的典型性, 而且在整个欧亚大陆草原区也有明显的代表性。



图 1 锡林浩特观测站及环境和近地层通量观测系统

Fig. 1 The observation station and its surrounding and flux observation system near the surface in Xilinhot

1.2 分析方法

由于 CO₂ 通量观测资料没有进行数据质量控制, 数据奇异值和缺测记录较多, 无法进行统计分析。经查阅文献和咨询相关专家, 对 30 min CO₂ 通量资料进行空气密度脉动修正, 即 WPL (Webb - Pearman - Leuning) 变换处理。WPL 通量修正简称为空气密度脉动修正, 是针对潜热和 CO₂ 通量的修正方法。由于热量和水汽的传输会引起空气体积发生变化, 从而使测量的标量密度 (浓度) 中包含一部分体积变化产生的影响, 这部分变化并不代表真实的物质增加或减少, 因此需要对其进行修正^[19]。WEBB ET AL 最早注意到了这个问题, 并通过体积变化引发空气垂直运动, 求出空气平均垂直运动速度 w , 再将 w 对平均质量的输送附加到脉动输送上, 以此来修正 CO₂ 通量, 是目前最为经典且广泛使用的 WPL 通量修正方法^[20], 其公式如下:

$$FC = w' \rho_{ds}' + \mu (\rho_{ds} / \rho) w' \rho_{ds}' + (1 + \mu \sigma) (\rho_{ds} / T) w' T' \quad (1)$$

式中: FC 为生态系统 CO₂ 通量 (g · m⁻²); w' 为空气瞬时垂直速度脉动量 (m · s⁻¹), 用三维超声风速计测定; ρ 为空气密度 (kg · m⁻³), ρ_{ds} 是标准状态下干空气密度为 1.29 kg · m⁻³; μ 为干空气与水汽分子量的比值; σ 为水汽与干空气密度的比值; T' 为空气温度脉动量 (°C)。然后, 根据稳定性检验和湍流总体特征检验对 30 min 通量数据修正结果进行质量评价, 对质量较差的数据舍弃, 共得到 CO₂ 通量的有效记录 141 714 条, 数据完整率为 84.3%。

2 结果与分析

2.1 典型草原 CO₂ 通量时间变化特征

2.1.1 日变化特征

统计内蒙古典型草原区 2007—2016 年平均

CO₂ 通量的逐时变化(图 2),发现内蒙古典型草原区平均 CO₂ 通量日变化呈现“+、-、+”的 U 型分布,傍晚 19:00(北京时,下同)至次日凌晨 06:00 表现为正值,但量值较小,不足 0.1 g·m⁻²,即夜间随着气温降低,草原下垫面 CO₂ 通量表现为弱排放过程;上午 07:00 开始,随着太阳升起,光照增强,气温升高,光合作用增强,地表开始吸收 CO₂,CO₂ 通量转为负值,一直持续到下午 18:00,并于上午 09:00—10:00 达到低谷,最小值为 -0.25 g·m⁻²,即典型草原在白昼 CO₂ 通量表现为吸收过程。经计算,内蒙古典型草原 CO₂ 通量日平均值为 -1.2 g·m⁻²,高于西藏那曲高寒草甸(-0.8 g·m⁻²),低于青藏高原玉树湿地(-2.23 g·m⁻²)^[21],说明典型草原生态系统 CO₂ 日通量总体表现为吸收过程,即为碳汇特征。

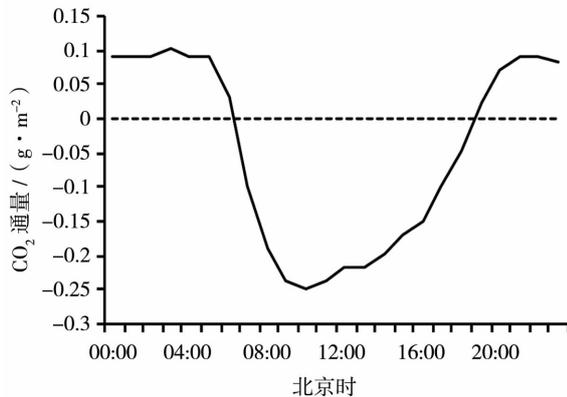


图 2 2007—2016 年内蒙古典型草原区平均 CO₂ 通量逐时变化

Fig. 2 The hourly variation of average CO₂ flux in typical grassland area of Inner Mongolia from 2007 to 2016

2007—2016 年冬半年(10 月 1 日至次年 3 月 31 日)和夏半年(4 月 1 日至 9 月 30 日)CO₂ 通量的日变化趋势(图 3)与全年基本相似,只是 CO₂ 通量正负转化时间早晚存在差异。其中,冬半年 CO₂ 通量从 08:00 开始由正值转为负值,一直持续到 17:00,持续时间约 9 h,且 13:00 达到低谷,最低值为 -0.12 g·m⁻²[图 3(a)];夏半年 CO₂ 通量由正值转为负值的时间较冬半年提前 1 h,而由负值转为正值的时间则较冬半年晚 1 h,即 07:00—18:00 为 CO₂ 通量负值时段,谷值出现在上午 09:00,为 -0.37 g·m⁻²,比冬半年早 4 h[图 3(b)]。

2.1.2 月变化特征

图 4 是 2007—2016 年内蒙古典型草原区 CO₂ 通量的月变化。可以看出,内蒙古典型草原区各月 CO₂ 通量以负值为主,总体表现为明显的吸收过程,其中 6 月和 7 月 CO₂ 通量负值较大,约为 -80 g·m⁻²,11 月 CO₂ 通量负值最小,为 -8.2 g·m⁻²,而只有 10 月 CO₂ 通量为正值,且数值较小,仅为 3.2 g·m⁻²。其原因是:植物生长期 CO₂ 的吸收能力与光合有效辐射变化有密切关系,太阳光是植物进行光合作用、制造有机物质的唯一能量来源,直接影响植物的生长发育和生产力的形成,植物生产力是植物通过光合作用将太阳能转化成化学潜能的产物。在光合有效辐射最强的 6、7 月,白天相对晚上的时间长,故植物用于光合作用的时间较长,使得碳吸收时间延长、碳释放时间缩短;而在植物生长前期(4 月之前)和后期(10 月之后),白天相对于晚上的时间短,导致植物光合作用的时间缩短,使得碳吸收时间缩短、碳释放时间延长。

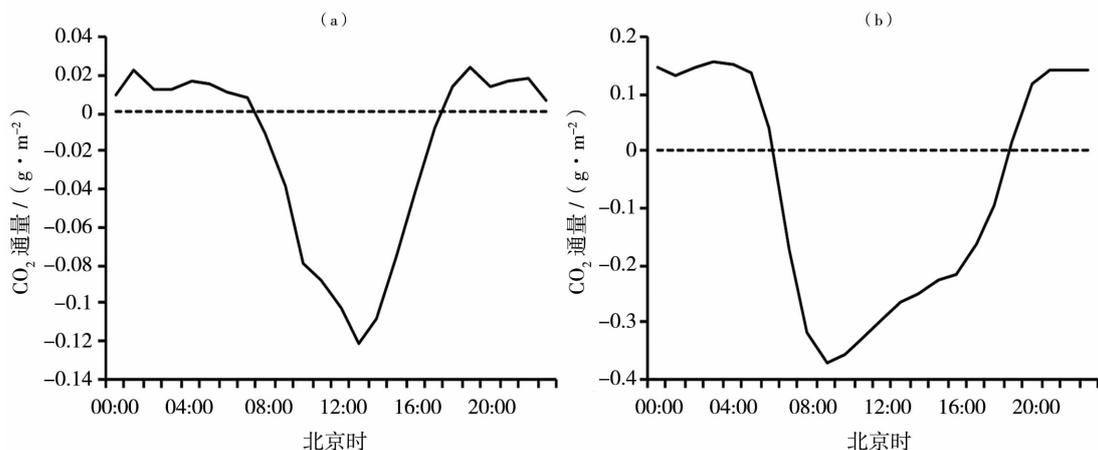


图 3 2007—2016 年内蒙古典型草原区冬半年(a)和夏半年(b)平均 CO₂ 通量日变化

Fig. 3 The diurnal variation of average CO₂ flux in typical grassland area of Inner Mongolia in winter half year (a) and summer half year (b) from 2007 to 2016

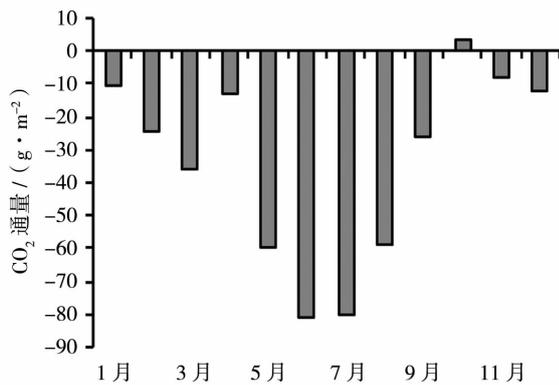


图4 2007—2016年内蒙古典型草原区平均CO₂通量月变化

Fig. 4 The monthly variation of average CO₂ flux in typical grassland area of Inner Mongolia from 2007 to 2016

总体来看,内蒙古典型草原区 CO₂ 通量总体表现为净吸收,夏季随着气温升高、降水增多,水热条件好转,植物进入生长盛期,同时根系生长和土壤微生物活动也随之增强,土壤呼吸作用达到最大,固碳能力增强,CO₂ 吸收最为明显,平均为 $-219.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;春季次之,平均为 $-107.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;冬、秋季随着气温和地温的逐渐降低,土壤呼吸作用随之减弱,植被枯黄,光合作用减弱,固碳能力下降,CO₂ 吸收较弱,通量负值最少,分别平均为 $-47.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $-30.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。综上所述,牧草生长季(5—9月)是草原区 CO₂ 的主要吸收期,也是主要固碳时期,CO₂ 通量平均为 $-304.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.1.3 年变化特征

由图5看出,内蒙古典型草原区 CO₂ 平均日通量仍以负值为主,负值日数约占全年的85%,全年CO₂ 通量吸收总量共计 $409.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中6—8月CO₂ 通量日吸收较大,最大值 $4.86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 出现在6月;而CO₂ 日通量为正值日数仅占全年的15%。

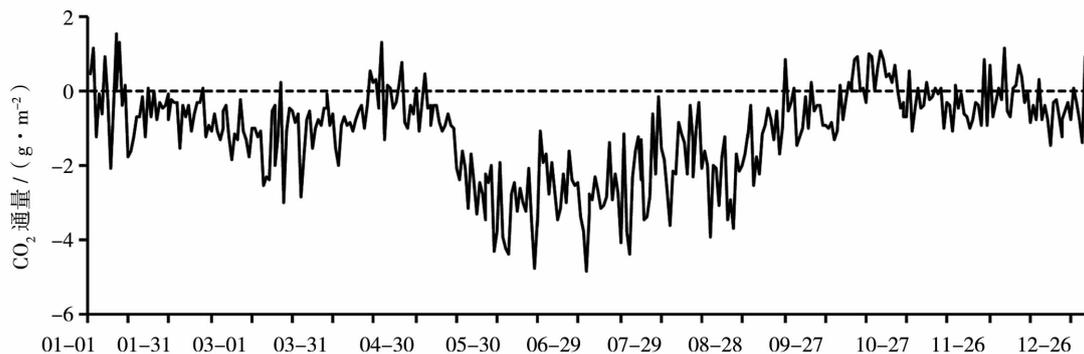


图5 2007—2016年内蒙古典型草原区平均CO₂通量的逐日变化

Fig. 5 The daily variation of average CO₂ flux in typical grassland area of Inner Mongolia from 2007 to 2016

且量值较小,CO₂ 通量日排放最大仅为 $1.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (出现在1月上旬),全年CO₂ 通量排放总量仅有 $21.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,说明内蒙古典型草原下垫面总体表现为吸收CO₂,即为碳汇,典型草原具有吸收并储存CO₂ 的能力。

2008—2016年内蒙古典型草原区 CO₂ 年通量均为负值,表现为碳吸收过程,2009年吸收最弱,CO₂ 通量仅为 $-95.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,而最强碳吸收出现在2012年,达 $-763.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图6),这与当年的气候条件有关。2009年为内蒙古典型草原区近10a最为干旱之年,年降水量仅240.0 mm,牧草生长关键期的6—8月累计降水仅146.0 mm(占年降水量的60.83%),降水尤其是生长期降水异常偏少,抑制了牧草生长,植被长势较差,光合作用较弱,致使土壤及植被固碳能力下降,CO₂ 通量绝对值最小;2012年为内蒙古典型草原区近10a降水最多年,年降水量为512.0 mm,是2009年的2.1倍,牧草生长最关键的6—8月降水量为343.2 mm(占年降水量的67.03%),平均气温为20℃左右,水热条件较好,地上植被密度大、生物量高,光合作用强,碳吸收能力强。

2.2 典型草原 CO₂ 通量的影响因素

草原下垫面 CO₂ 通量的变化规律与植物的生长周期密切相关,各种气候要素通过影响植物生长而对CO₂ 通量产生影响。下面将从影响牧草生长的气温、降水、植被指数等要素着手,探讨引起CO₂ 通量变化的主要因素。

2.2.1 气温与CO₂ 通量的关系

通常温度升高能促进土壤呼吸及植物光合作用,使得CO₂ 吸收能力增强。然而,在草原生态群落生长演变过程中,热力因子的年际及年内差异较大,因此,不同时间尺度及不同生长期热量因子对CO₂ 通量影响贡献不同。

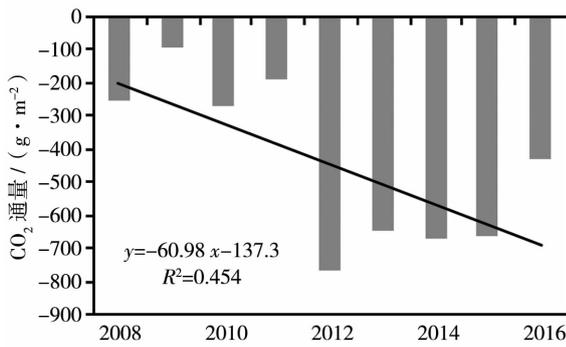


图6 2008—2016年内蒙古典型草原区CO₂通量年变化及趋势

Fig. 6 The annual change and its trend of CO₂ flux in typical grassland area of Inner Mongolia from 2008 to 2016

从内蒙古典型草原2007—2016年平均CO₂日通量与同时段气温的变化趋势(图7)来看,随着气温升高,CO₂通量负值增大,即吸收能力增强,CO₂日通量绝对值与日平均气温呈正相关。其中,当日平均气温在10℃以下时,CO₂日通量值较小,在0 g·m⁻²值附近波动,此时正值内蒙古典型草原区冬季及冬、春季转化时期,气温波动较大;随着地面温度的逐渐升高,4月下旬至5月上旬土壤解冻,牧草返青,吸收CO₂能力逐渐加强,当日平均气温达到20℃时(即典型草原区进入盛夏),水热条件为一年中最好时期,牧草进入生长旺盛阶段,植物光合作用增强,CO₂吸收能力达到最大;而后,伴随着温度的降低,CO₂通量吸收能力减弱,一直持续到9月下旬日平均气温降至10℃左右,此时牧草进入枯黄期,植物光合作用减弱甚至停止,CO₂通量在0 g·m⁻²值附近波动,吸收能力几乎为0 g·m⁻²,甚至表现为弱排放。究其原因,在典型草原区牧草

生长季光照和热量充足,基本能够满足牧草光合作用及生长发育需求,而当气温超过20℃时则会抑制牧草生长进程,减少CO₂通量的吸收,日平均气温在10~20℃之间是CO₂通量吸收的最佳时期。

2.2.2 降水量与CO₂通量的关系

内蒙古典型草原区1—4月降水较少,月平均降水量在10.0 mm左右,且均以降雪为主,由于地面积雪覆盖,反照率较大,CO₂通量基本维持在0 g·m⁻²值线附近;进入5月随着气温升高,积雪融化,地表解冻,且降水增多,地表植被返青,光合作用增强,CO₂通量吸收能力逐渐增强,但滞后于降水量的变化约1周;6—8月是草原区降水最多时期,约占年降水量的70%左右,此时CO₂通量吸收能力最强,两者滞后性负相关最为明显;9月底之后随着降水的减少,地上植被已停止生长,光合作用减弱,CO₂通量吸收能力减弱,基本在0 g·m⁻²值附近波动(图7)。

2.2.3 牧草不同生长期气候要素与CO₂通量的关系

表1列出内蒙古典型草原区牧草不同生长期气候要素与CO₂通量的相关系数。可知,典型草原牧草返青期(4月16—27日)的CO₂通量与平均气温、地温及日照时数等热量因子呈负相关,尤其受地温的影响最明显,相关系数为-0.472 4(未通过0.1的信度检验),表明地温越高,地表解冻越早,土壤呼吸作用增大,地表释放的CO₂通量越大,牧草返青越早;随着牧草的生长,光合作用逐渐加强,地表吸收CO₂能力逐渐增大,即CO₂通量负值逐渐增大。而与降水量、水汽压、低云量等水分因子呈正相关,尤其与降水量的相关性最密切,相关系数为0.443 2(未通过0.1的信度检验)。其原因是,4月下旬典型草原区的平均气温在5℃以下,降水主要以雪或

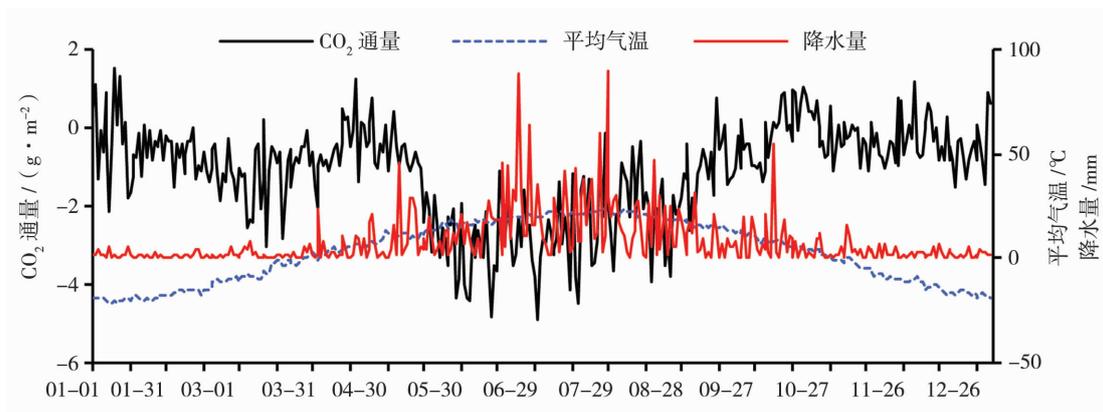


图7 2007—2016年内蒙古典型草原区CO₂通量与平均气温、降水量逐日变化

Fig. 7 The daily variations of average CO₂ flux and average temperature, precipitation in typical grassland area of Inner Mongolia from 2007 to 2016

表1 内蒙古典型草原区 2007—2016 年 CO₂ 通量与牧草不同生长期气候要素的相关系数
Tab.1 The correlation coefficients between CO₂ flux and climate elements in different growth period of pasture in typical grassland area of Inner Mongolia from 2007 to 2016

生育期	平均气温	地面温度	5 cm 地温	日照时数	降水量	低云量	水汽压
返青期	-0.177 6	-0.472 4	-0.471 8	-0.188 6	0.443 2	0.007 0	0.271 3
开花期	0.553 4*	0.522 0*	0.518 2*	0.278 7	-0.913 7***	-0.693 7**	-0.741 6***
枯黄期	0.538 8*	0.332 3	0.451 4	0.229 9	-0.276 2	-0.283 7	-0.033 2

注: *、**、*** 分别表示通过 0.1、0.05、0.01 的信度检验。

雨夹雪为主,降水越多,地面融雪所需的热量越多,地温越低,牧草返青越晚^[19],地表解冻越晚,CO₂ 通量越小。

典型草原牧草开花期(7月20日至8月20日),是牧草生长最旺盛时期,也是草原区温度最高时期。开花期 CO₂ 通量与热量因子呈正相关,与水分因子呈负相关,这与返青期的变化特征正相反(表1)。内蒙古典型草原区开花期的平均气温为 20.0~22.9℃,基本可满足牧草生长所需。如果温度过高,且高温往往与干旱少雨相伴,从而抑制牧草生长,减弱光合作用能力,降低 CO₂ 的吸收,这与以往的研究结论^[22-24]一致。另外,降水越多,牧草长势越好,光合作用越强,吸收 CO₂ 的能力越强,两者呈极显著负相关关系,相关系数达 -0.913 7(通过 0.01 的信度检验)。

典型草原牧草枯黄期(9月11—27日),牧草已完成其生长过程,热量和水分因子对其影响减弱,表现为各因子与 CO₂ 通量的相关程度较开花期显著减小,但热量因子对 CO₂ 通量仍为正影响,水分因子仍为负影响,除平均气温外都未通过信度检验(表1)。可见,温度升高、降水减少会加速牧草黄枯化的进程,随着牧草的枯萎,光合作用减弱,牧草吸收 CO₂ 的能力也随之减弱。

2.2.4 NDVI 与 CO₂ 通量的关系

对 2007—2016 年内蒙古典型草原区牧草生长季(5—9月)各月 CO₂ 通量与 NDVI 进行相关分析(表略),发现各月 CO₂ 通量与 NDVI 均呈负相关,7月和8月的相关系数(0.8以上)达极显著水平(通过 0.01 的信度检验),其余月份未通过显著性检验。7—8月是典型草原水热条件最好时期,牧草植被指数高,植物光合作用强,吸收 CO₂ 能力强,这与前面的分析结论一致。

3 结论与讨论

(1)内蒙古典型草原区牧草 CO₂ 通量存在明显的年际、季节和日变化特征。CO₂ 通量日变化呈现

夜间弱排放、白天强吸收的“U”型分布。日、月、季及全年尺度的 CO₂ 通量主要以吸收为主,说明典型草原表现出典型的碳汇特征。

(2)牧草不同生长期水热条件对 CO₂ 通量的影响不同。返青期地温升高、降雪减少,牧草返青期提前,CO₂ 通量负值增大,即吸收 CO₂ 能力增强;开花期与返青期正好相反,开花期光照和温度基本满足牧草生长所需,且降水增多,从而加速牧草生长进程,CO₂ 吸收能力增强;而枯黄期的干热少雨加快了牧草枯萎进程,CO₂ 通量负值降低,即吸收能力减弱。

(3)CO₂ 通量与植被指数呈负相关,NDVI 越高,吸收 CO₂ 能力越强,CO₂ 通量负值越大,尤其是7月和8月二者相关性极高。7月和8月是典型草原 NDVI 最大时期,此时也是吸收碳能力最强时期。

内蒙古典型草原表现为碳汇特征,不同时间尺度对 CO₂ 通量影响程度不同,尤以牧草生长最旺盛的6—9月影响最为显著。由于典型草原生态脆弱,气候条件和人类活动对其影响较大。影响 CO₂ 通量的因子较为复杂,除本文分析的日照时数、平均气温、地面温度、降水量、云量等因子外,还有土壤湿度、气温日较差、光合有效辐射以及放牧强度、草地退化、畜牧业灾害等其他因素。限于目前资料,今后将考虑获取更长时间序列的观测资料,分不同时段(如降雨时段、干旱时段等)、不同草原类型开展草原 CO₂ 通量变化特征的深入分析,探究 CO₂ 通量变化的机理。

参考文献:

- [1] 李绚丽,谈哲敏. 大气圈碳循环的模拟研究进展[J]. 气象科学,2000,20(3):400-412.
- [2] 张文君,谭桂容. 全球变暖形势下中国陆表水分的变化[J]. 大气科学学报,2012,35(5):550-563.
- [3] 孙善磊,周锁铨,薛根元,等. 环杭州湾地区自然植被净初级生产力的变化特征及其成因[J]. 大气科学学报,2011,34(6):672-682.
- [4] 张佳华,卞林根,延晓冬,等. 碳循环及对气候变化和人类生存

- 环境的影响[J]. 气象科学, 2006, 26(3): 350 - 354.
- [5] 杜群, 刘辉志, 冯健武, 等. 半干旱区草原生态系统的碳交换特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 711 - 722.
- [6] 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.
- [7] FRANK A B. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 397 - 403.
- [8] MIELNICK P C, DUGAS W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(2): 221 - 228.
- [9] KABWE L K, HENDRY M J, WILSON G W, et al. Quantifying CO₂ fluxes from soil surfaces to the atmosphere[J]. Journal of Hydrology, 2002, 260: 1 - 14.
- [10] CRAINE J M, WEDIN D A. Determinants of growing season soil CO₂ flux in a Minnesota grassland[J]. Biogeochemistry, 2002, 59(3): 303 - 313.
- [11] SIMS P L, BRADFORD J A. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109(2): 117 - 134.
- [12] BEHERA N, PATI D P. Carbon budget of a protected tropical grass - land with reference to primary production and total soil respiration[J]. Revue D'écologie Et De Biologie Du Sol, 1986, 23: 167 - 181.
- [13] HOLT J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semiarid northeastern Australia[J]. Applied Soil Ecology, 1997, 5(2): 143 - 149.
- [14] 董云社, 齐玉春, 刘纪远, 等. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征[J]. 科学通报, 2005, 50(5): 473 - 480.
- [15] 齐玉春, 董云社, 刘纪远, 等. 内蒙古半干旱草原 CO₂ 排放通量日变化特征及环境因子的贡献[J]. 中国科学: 地球科学, 2005, 35(6): 493 - 501.
- [16] 李明峰, 董云社, 耿元波, 等. 温带草原生态系统 CO₂ 排放对环境因子变化的响应[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1722 - 1727.
- [17] 汪文雅, 郭建侠, 王英舜, 等. 锡林浩特草原 CO₂ 通量特征及其影响因素分析[J]. 气象科学, 2015, 35(1): 100 - 107.
- [18] 张新时, 周广胜, 高琼, 等. 全球变化研究中的中国东北森林—草原陆地样带 (NECT) [J]. 地学前沿, 1997, 4(1/2): 145 - 151.
- [19] 柳媛普, 李锁锁, 吕世华, 等. 几种通量资料修正方法的比较[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1704 - 1711.
- [20] WEBB E K, PEARMAN G L. Correction of CO₂ transfer measurements for the effect of water vapors transfer [C] // Second Australasian Conference on Heat and Mass Transfer. Sydney: University of Sydney, 1977: 469 - 476.
- [21] 张海宏, 李林, 周秉荣, 等. 青藏高原高寒湿地 CO₂ 通量特征及影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 55 - 60.
- [22] 王海梅, 侯琼, 冯旭宇, 等. 自然降雨过程对典型草原土壤水分的影响研究[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 1010 - 1015.
- [23] 周秉荣, 朱生翠, 李红梅. 三江源区植被净初级生产力时空特征及对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 958 - 965.
- [24] 杨扬, 左洪超, 王丽娟, 等. 干旱区荒漠草原过渡带快速变化的陆面过程特征观测分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 412 - 420.

Variation Characteristics of CO₂ Flux and Its Influence Factors in Typical Grassland Area of Inner Mongolia

BAI Meilan, MENG Yujing, DONG Zhulei, LI Xicang

(Climate Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China)

Abstract: Based on the 30 - minutely CO₂ flux observation data during 2007 - 2016 in Xilinhot national climate observatory in typical grassland area of Inner Mongolia and contemporaneous temperature, precipitation, etc., the CO₂ flux data were corrected by using WPL method. And on this basis the variation characteristics of CO₂ flux and its influence factors in typical grassland of Inner Mongolia in different periods were analyzed statistically. The results are as follows: (1) The CO₂ flux in typical grassland of Inner Mongolia had obvious annual, seasonal and diurnal variation characteristics, and the typical grassland presented carbon sinks characteristic, especially in the growing season of pasture. The CO₂ flux presented an obvious diurnal variation with 'U' shape, and CO₂ was emitted at night and absorbed in the daytime, the CO₂ flux reached the maximum between 09:00 and 10:00. The pasture mainly absorbed CO₂ in the whole year and growing season, the value of CO₂ flux was negative, and the absorption was most in summer, followed by spring and autumn, while it was lowest in winter. (2) The effects of climate elements on CO₂ flux in different growth periods of pasture were different. The CO₂ flux in the green up period of pasture was negative correlated with heat factors and moisture factors had a positive contribution. On the contrary, the CO₂ flux in the flowering and withering period of pasture was positive related to heat factors and moisture factors had a negative contribution, and the contribution of heat and moisture factors to CO₂ flux was most significant in the flowering period. (3) NDVI was negative correlated with CO₂ flux in the growing season of pasture (from May to September), and the correlation between them was highly significant in July and August.

Key words: typical grassland; CO₂ flux; variation characteristics; carbon sinks; effect factors