

李梓铭, 杜睿, 杜鹏瑞, 等. 2014. 生长旺盛期呼伦贝尔草甸草原生态系统呼吸与 CH₄ 吸收通量的日变化研究 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 743–752, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13108. Li Ziming, Du Rui, Du Pengrui, et al. 2014. Diurnal variation in methane flux and ecosystem respiration rate during the growing season in Hulunbuir grassland, Inner Mongolia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 743–752.

生长旺盛期呼伦贝尔草甸草原生态系统呼吸与 CH₄ 吸收通量的日变化研究

李梓铭¹ 杜睿¹ 杜鹏瑞¹ 秦赛赛^{1,2} 王亚玲¹ 梁宗敏¹ 钟磊¹

¹ 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

² 河南大学环境与规划学院, 开封 475000

摘要 利用静态箱法于 2011 年结实期和 2012 年开花期与结实期分别对不同人类活动（自由放牧和刈割）影响下的呼伦贝尔草甸草原及相应的封育草原的 CH₄ 通量和植物土壤系统呼吸作用排放的 CO₂ 通量进行野外定位观测研究。结果表明：呼伦贝尔草甸草原（放牧和刈割及其对应的封育样地）均表现为 CH₄ 的汇，3 个观测时期汇强的变化范围为：-23.98±6.40~-95.96±28.57 μgCm⁻² h⁻¹。呼伦贝尔草甸草原 CH₄ 通量的日变化对温度的响应较为复杂。不同时期呼伦贝尔草甸草原的植物土壤系统呼吸速率的日变化存在差异，水分和温度的共同影响造成 2012 年结实期日均 CO₂ 排放量低于 2011 年结实期。放牧对呼伦贝尔草甸草原 CH₄ 吸收通量的日变化模式的影响较小，但在 2011 年结实期和 2012 年开花期促进了 CH₄ 日均通量（促进幅度 12.05%~93.35%），2012 年结实期放牧降低了 CH₄ 日均通量（降低幅度 23.32%~30.43%）；刈割降低 CH₄ 吸收日均通量 11.55%~60.62%。呼伦贝尔草甸草原日均累计碳排放量中 CH₄ 所占比例为 0.35%~2.62%，而放牧和刈割行为对呼伦贝尔草甸草原的日均累计碳排放的影响结果在不同物候期以及不同植被群落类型均有不同。

关键词 呼伦贝尔草甸草原 放牧 刈割 CH₄ 通量 CO₂ 排放速率 日变化

文章编号 1006-9585 (2014) 06-0743-10

中图分类号 P402

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13108

Diurnal Variation in Methane Flux and Ecosystem Respiration Rate During the Growing Season in Hulunbuir Grassland, Inner Mongolia

LI Ziming¹, DU Rui¹, DU Pengrui¹, QIN Saisai^{1,2}, WANG Yaling¹, LIANG Zongmin¹, and ZHONG Lei¹

¹ College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

² College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475000

Abstract Using a static opaque chamber method, a field experiment was conducted in-situ in the Hulunbuir meadow grassland, Inner Mongolia, during the seeding period (2011 and 2012) and flowering period (2012) to investigate the effects of grazing and mowing on the diurnal variation in methane flux and ecosystem respiration rate. The results show that the Hulunbuir meadow grassland soils were a sink of CH₄, with the average CH₄ diurnal fluxes ranging from -23.98±6.40 to -95.96±28.57 μgCm⁻² h⁻¹ in the three experimental periods. The relationship between the diurnal variation in CH₄ flux and temperature is complex in the study area, and some differences were observed in the diurnal variation of soil-plant system respiratory CO₂ emission fluxes during the experimental periods. During the seeding period in 2011, the daily mean soil-plant system respiration CO₂ emission fluxes were higher than in 2012, as a result of the

收稿日期 2013-06-19 收到, 2013-09-27 收到修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项——应对气候变化的碳收支认证及相关问题 XDA05020401

作者简介 李梓铭, 男, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆地生态系统温室气体通量的观测研究。E-mail: xkpyf@qq.com

通讯作者 杜睿, E-mail: ruidu@ucas.ac.cn

interaction of water and temperature. The influence of grazing on the diurnal variation of CH₄ fluxes was very limited, however, the observations suggest that grazing could have increased the daily average CH₄ flux from 12.05% to 93.35% during the seeding period in 2011 and the flowering period in 2012, but reduced it from 23.32% to 30.43% during the seeding period in 2012. Mowing could be responsible for a decrease in the average daily CH₄ flux, from 11.55% to 60.62%. Considering the cumulative daily carbon emissions, CH₄ absorption accounts for only 0.35%–2.62% of the total in the Hulunbuir meadow grasslands. Moreover, the impact of grazing and mowing on the mean cumulative daily carbon emissions differed significantly between the different phenological periods and vegetation types.

Keywords Hulunbuir meadow grassland, Grazing, Mowing, Methane flux, CO₂ emission rate, Diurnal variation

1 引言

草地生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 占到全球总陆地面积的三分之一; 因草地生态系统储存了全球 10%~30% 的土壤碳 (Eswaran et al., 1993), 并且其碳库较为稳定, 使其对全球碳循环有重要影响 (Risch and Frank, 2010)。二氧化碳 (CO₂) 和甲烷 (CH₄) 是重要的含碳温室气体, 大量观测和研究表明, 自工业革命以来, 人类活动已引起大气中 CO₂ 和 CH₄ 浓度的增加, 其中 CH₄ 已由工业化前的 715 ppb ($\times 10^9$) 增至 2005 年的 1774 ppb (IPCC, 2007), 另据最新资料表明 CO₂ 浓度较工业革命前增加了 39% (O Edenhofer et al., 2010), 因而其变化趋势、源汇等研究已成为全球变化研究中的焦点。

在我国, 草地面积约为国土面积的 40%, 其中占草地总面积 78% 的北方天然草原生态系统是我国草地生态系统的主体 (陈佐忠和汪诗平, 2000); 呼伦贝尔草甸草原是我国保存最为完好的草原之一 (朱立博等, 2001), 因其独特的地理位置、典型的生态系统特征及先进的草原畜牧业生产经营方式, 是我国北方草原区重要的农业、牧业基地 (李博, 1997)。自由放牧和刈割是呼伦贝尔地区畜牧业发展的两种主要管理措施。羊草草原是欧亚大陆草原东缘所特有的草地群落类型, 广泛分布于我国东北和内蒙古东部、蒙古共和国东部、俄罗斯外贝加尔地区, 总面积约为 $4.2 \times 10^5 \text{ km}^2$; 贝加尔针茅作为丛生型多年生禾本科植物, 广泛分布于我国北方地区, 可形成群落的建群种 (杨允菲和张宝田, 2005)。有关呼伦贝尔草甸草原 CH₄ 通量及草原生态系统呼吸 CO₂ 日变化的研究尚未见诸报道, 尤其是有关人类活动的影响的研究较少, 因此本文选取 3 种具有代表性的呼伦贝尔草甸草原类型 (羊草草甸草原、贝加尔针茅草甸草原、羊草+中生性杂类草草甸草

原) 进行生态系统呼吸和 CH₄ 通量的日变化观测, 旨在填补该地区有关 CH₄ 通量和生态系统呼吸 CO₂ 排放通量研究的空白, 此外通过设置对应的放牧与封育处理探索放牧和刈割对该地区 CH₄ 与生态系统呼吸日变化的影响及其强度, 为制定合理的草原减排措施提供依据, 为进一步完善我国草地生态系统主要温室气体排放清单提供科学依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

研究区域位于内蒙古呼伦贝尔海拉尔市谢尔塔拉牧场, 在中国农业科学院呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测站附近 (49°19'N~49°21'N, 119°55'E~119°58'E), 该区属于蒙古高原草原植物区, 海拔较低, 一般在 630~760 m, 地形呈波状起伏。受温带大陆季风气候影响, 年均降雨量 350~400 mm, 且年际间分布极不平衡, 多分布于 7~9 月; 年均温 -2~-1 °C, 极端最高、最低气温分别达 36.17 °C 和 -48.5 °C; 大于等于 10 °C 年积温 1780~1820 °C, 无霜期 100~120 d。植被以中旱生植物为主体, 代表性植被类型为温带草甸草原。草群高度一般为 20~60 cm, 盖度 50%~80%, 种的饱和度约为 20 m⁻², 该地区主要优势植物有羊草 (*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis* Roshev.)、日阴菅 (*Carex pediformis*)、线叶菊 (*Filifolium sibiricum*) 等。地带性土壤为黑钙土或暗栗钙土。

2.2 试验设计及数据分析

分别选取位于谢尔塔拉牧场六队羊草草甸草原样地 (中心坐标 49°22'20"N, 120°1'44"E)、十一队贝加尔针茅草甸草原 (中心坐标 49°21'10"N, 120°6'9"E) 和十二队羊草+中生性杂类草草甸草原样地 (中心坐标 49°19'10"N, 120°5'52"E), 每处样地分别设置一组对照处理, 具体样地参数见表 1。

表 1 各样地试验设置及参数

Table 1 Background information of experimental sites

样地	处理方式	植被类型	围封		采样箱高度/cm
			年限	编号	
六队样地	自由放牧	羊草	2006 年	LC-G	50
	围栏封育	羊草		LC-F	60
十一队样地	自由放牧	贝加尔针茅	2006 年	SB-G	50
	围栏封育	贝加尔针茅		SB-F	60
十二队样地	刈割 (三年一割)	羊草+中生性杂类草	2006 年	LC-M	50
	围栏封育	羊草+中生性杂类草		LC-UM	60
	围栏封育	杂类草			

草地生态系统的 CH₄ 通量和生态系统 CO₂ 呼吸排放速率观测均使用静态暗箱—气相色谱法。静态暗箱—气相色谱法的测量原理详见 (Wang and Wang, 2003; 王跃思和王迎红, 2007)。采样分析系统由样品采集系统、气相色谱分析系统组成; 所使用采样箱为不锈钢暗箱, 外层覆盖泡沫保温材料, 其底面为正方形 (50 cm×50 cm), 采样箱高度根据不同处理的实际情况确定 (详见表 1), 基座高度为 15 cm, 为减少对土壤的扰动, 将采样箱基座嵌入采样位点并使其上口与地面水平。样品采集系统主要包括三通阀和医用注射器, 由于 CH₄ 和 CO₂ 通量时空变异较大, 因此每个样地设置 3 个平行重复采样点, 以便更加接近生态系统的自然状态; 所采集的气体样品均在 24 h 内送回实验室完成 CH₄、CO₂ 浓度的分析测定, 采样同时利用电子温度计 (JM624, China) 进行大气温度、罩箱区域地表温度的测定; 使用 HOBO 小型自动气象站 (H21-002, ONSET Corporation, USA) 采集 10 cm、20 cm 土壤水分和温度。

分别于 2011 年 8 月 10 日 (2011 年结实期, SD11)、2012 年 6 月 18 日 (2012 年开花期, FR12)、2012 年 8 月 8 日 (2012 年结实期, SD12) 进行呼伦贝尔草原 CH₄ 通量和草原生态系统呼吸 CO₂ 排放速率日变化的观测, 每次采样自当日 08:00 (北京时间, 下同) 开始至次日 10:00 结束, 采样频率为 2 h, 每次采样持续 20 min, 使用医用注射器分别于罩箱后 0、20 min 采取箱内气体 60 ml。

各样地的气体样品经气相色谱分析后, 根据如下公式计算草地 CH₄ 通量和生态系统呼吸速率:

$$F = \rho_i \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{dC_i}{dt}, \quad (1)$$

其中, $i=1, 2$, 分别代表 CH₄、CO₂, F 为气体通量,

通量为正则说明生态系统排放该温室气体, 为负则吸收该温室气体; ρ 为标准状况 (0 °C 和 101.325 kPa) 下的气体密度; p 代表测定时的大气压; p_0 为标准大气压; T 为测定时的空气温度 (单位: K); T_0 为标准状况温度 (单位: K); dC/dt 为浓度随时间的变化率。本文通量表示格式为: 平均值±标准偏差。

日均累计碳排放计算公式如下:

$$F_{CCE} = F_{CO_2\text{emission}} \times 24 \times 10^{-3} + F_{CH_4\text{flux}} \times 26 \times 24 \times 10^{-6}, \quad (2)$$

其中, F_{CCE} (Cumulative Carbon Emission) 表示累计碳排放量, 单位为 $gCm^{-2} d^{-1}$, $F_{CO_2\text{emission}}$ 表示累计 CO₂ 排放量, 单位为 $mgCm^{-2} h^{-1}$, $F_{CH_4\text{flux}}$ 表示累计 CH₄ 通量, 单位为 $\mu gCm^{-2} h^{-1}$ 。

2.3 统计分析

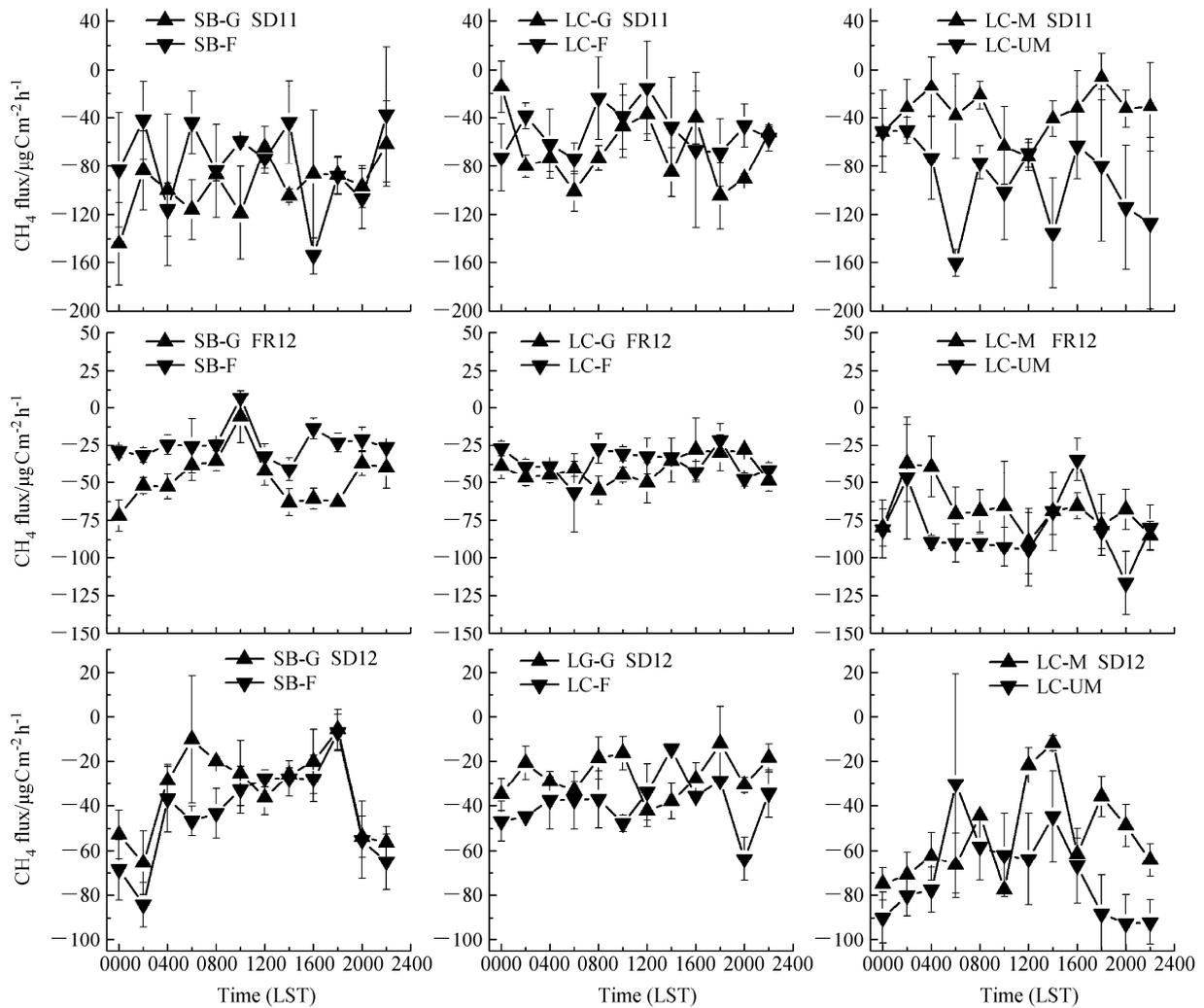
采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 来区分不同处理之间 CH₄ 通量与生态系统呼吸日变化的差异 (如放牧与封育对照处理、刈割与封育对照处理), 在相关分析中采用 Pearson 分析。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 来比较不同时期不同参数的差异 (如不同物候期昼、夜均通量、土壤理化性质以及土壤水分和地上生物量等)。所有统计分析过程均在 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 17.0 (SPSS Inc., USA) 中完成, 图形使用 Origin 8.0 (OriginLab, USA) 绘制。

3 结果与讨论

3.1 不同天然草原 (封育) CH₄ 通量与土壤植物系统呼吸 CO₂ 排放速率的日变化特征

3.1.1 CH₄ 通量的日变化特征

由图 1 发现封育后呼伦贝尔天然草原 CH₄ 通量日变化无明显的规律, 无论在最强/弱峰值通量及其出现时间或者 CH₄ 吸收通量的变化模式上都未显示相似的规律性。尽管其他地区的研究表明草原 CH₄ 吸收通量的日变化有一定的规律 (杜睿等, 2005; 齐玉春等, 2004), 但在呼伦贝尔天然草原并没有展现出来。3 个观测时期呼伦贝尔天然草原日均 CH₄ 吸收通量的变化范围分别为 $-50.74 \pm 28.50 \sim -91.82 \pm 34.52 \mu gCm^{-2} h^{-1}$ (SD11)、 $-23.98 \pm 6.40 \sim -80.47 \pm 17.39 \mu gCm^{-2} h^{-1}$ (FR12)、 $-38.46 \pm 2.75 \sim -70.48 \pm 17.58 \mu gCm^{-2} h^{-1}$ (SD12), 总的来说呼伦贝尔天然草原表现为 CH₄ 的汇; 不同观测时期呼伦贝尔天然草原的日均 CH₄ 汇强弱对比顺序为

图1 呼伦贝尔草原不同物候期 CH₄ 通量的日变化Fig. 1 Diurnal variation of CH₄ flux in Hulunbuir meadow grassland

SD11>SD12>FR12。

利用 SPSS 统计分析软件分析呼伦贝尔天然草原的 CH₄ 吸收通量日变化与大气温度、地表温度、10 cm 及 20 cm 土壤温度的关系,发现除 2012 年结实期 SB-F 和 LC-UM 样地的 CH₄ 通量分别与地表温度和 20 cm 土壤温度及 2011 年结实期 LC-F 样地的 CH₄ 通量与 20 cm 土壤温度呈现出显著性相关关系外,天然草原其他观测时期的 CH₄ 通量与温度的相关关系均不显著(表 2)。此外将日变化的时间尺度细分为昼、夜 2 个更短的时间尺度进行分析表明:天然草原 3 个观测时期的 CH₄ 昼均通量、夜均通量之间不存在显著差异(组方差值 $F=0.493$, 统计显著性检验的概率 $P=0.493$, 样本数 $n=9$),既有昼均通量高于夜均通量,也存在夜均通量大于昼均通量的现象。该结果与王艳芬等(2003)、董云社等

(2000) 和齐玉春等(2002b) 所发现的草地生态系统和森林生态系统土壤 CH₄ 吸收通量的日变化存在“昼低夜高”的现象并不一致,这说明呼伦贝尔天然草原 CH₄ 通量的日变化对温度的响应较为复杂,有关草原土壤吸收 CH₄ 的机理尚需进一步的试验研究(王艳芬等, 2003)。

方差分析显示, 2011 年和 2012 年结实期天然羊草草甸草原 CH₄ 日均吸收通量高于天然草原贝加尔针茅草原,而在 2012 年开花期前者则显著的低于后者(表 3),表明并非是不同的草原植被类型导致不同天然草原 CH₄ 日均吸收通量的差异,更可能与土壤中的速效氮含量有关,有研究表明土壤中硝态氮和氨态氮对土壤吸收 CH₄ 有抑制作用,抑制程度随着硝态氮和氨态氮含量的增加而增加(Kravchenko, 2002); 根据 2012 年开花期和结实

表 2 呼伦贝尔草原不同时期 CH₄ 通量和 CO₂ 排放速率的日变化与温度的皮尔逊相关系数Table 2 Pearson correlation coefficient between CH₄ flux, CO₂ emission rate, and temperature

观测期	样地	与 CH ₄ 通量日变化的皮尔逊相关系数				与 CO ₂ 排放速率日变化的皮尔逊相关系数			
		<i>T</i>	<i>T</i> ₀	<i>T</i> ₁₀	<i>T</i> ₂₀	<i>T</i>	<i>T</i> ₀	<i>T</i> ₁₀	<i>T</i> ₂₀
SD11	SB-G	0.210	0.188	0.249	-0.013	0.532	0.603*	0.517	-0.206
	SB-F	-0.238	-0.387	-0.081	-0.081	-0.238	-0.387	-0.081	-0.081
	LC-G	0.040	0.058	-0.062	-0.114	0.709**	0.788**	-0.291	-0.291
	LC-F	0.259	-0.341	-0.344	-0.579*	0.040	0.058	-0.062	-0.114
	LC-M	-0.264	-0.015	0.346	0.379	0.731**	0.765**	0.841**	0.559
	LC-UM	0.024	0.030	0.016	0.130	0.259	-0.341	-0.344	-0.579*
FR12	SB-G	0.053	-0.122	-0.562	-0.425	0.611*	0.836**	0.395	-0.279
	SB-F	0.222	-0.050	-0.178	-0.270	0.222	-0.050	-0.178	-0.270
	LC-G	-0.113	-0.097	0.644*	0.570	0.077	0.309	0.263	0.061
	LC-F	0.296	0.324	0.211	0.121	-0.113	-0.097	0.644*	0.570
	LC-M	-0.433	-0.438	-0.353	-0.238	0.385	0.456	0.134	-0.026
	LC-UM	0.035	0.126	0.313	0.203	0.296	0.324	0.211	0.121
SD12	SB-G	0.417	0.335	0.373	0.696*	-0.698*	-0.646*	-0.192	-0.706*
	SB-F	-0.698*	-0.646*	-0.192	-0.706*	0.749**	0.730**	0.205	-0.487
	LC-G	0.749**	0.730**	0.205	-0.487	-0.643*	-0.647*	-0.118	0.478
	LC-F	-0.643*	-0.647*	-0.118	0.478	0.064	0.050	-0.172	-0.190
	LC-M	0.064	0.050	-0.172	-0.190	-0.416	-0.442	-0.127	0.340
	LC-UM	-0.416	-0.442	-0.127	0.340	0.505	0.408	0.194	0.050

注: *T*、*T*₀、*T*₁₀、*T*₂₀ 分别代表大气温度、地表温度、10 cm 和 20 cm 土壤温度; *代表两者相关性达到 0.05 的显著性水平, **代表两者相关性达到 0.01 的显著性水平。

表 3 不同样地之间 CH₄ 通量和生态系统呼吸速率的差异性分析Table 3 Comparison of CH₄ flux and ecosystem respiration rate between different experiment sites

比较处理	CH ₄ 通量						生态系统呼吸速率					
	SD11		FR12		SD12		SD11		FR12		SD12	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
SB-G 和 SB-F	2.25	0.15	14.05	0.00**	1.46	0.23	0.31	0.57	4.57	0.04*	13.83	0.00**
LC-G 和 LC-F	2.54	0.13	1.28	0.27	6.87	0.01*	0.22	0.64	2.01	0.17	0.29	0.59
SB-F 和 LC-F	5.25	0.03*	8.23	0.01**	0.50	0.48	2.50	0.12	6.60	0.02*	1.59	0.22
LC-M 和 LC-UM	22.89	0.00**	2.56	0.12	4.13	0.05	2.88	0.10	13.83	0.00**	31.57	0.00**

*代表两者差异达到 0.05 的显著性水平, **代表两者差异达到 0.01 的显著性水平。

期的土壤理化性质数据表明在开花期 SB-F 样地的硝态氮和氨氮低于 LC-F 样地, 而结实后期则高于 LC-F 样地, 从而造成了呼伦贝尔天然草原不同群落类型之间 CH₄ 吸收通量的差异。

3.1.2 土壤植物系统呼吸 CO₂ 排放速率的日变化特征

2011 年呼伦贝尔天然草原的 CO₂ 排放日变化规律明显, 呈现出单峰型的特点 (图 2)。SB-F、LC-F、LC-UM 样地的 CO₂ 排放在日出之后不断上升, 分别于 16:00 至 18:00 达到最大排放, 进入夜间逐渐降低。而 2012 年开花期除 LC-UM 样地的 CO₂ 排放的日变化有双峰型的特点外, 其他样地则无明显的规律性。2012 年结实期各天然草原样地的 CO₂ 排放均没有显著的规律。

不同观测时期各样地的日均 CO₂ 排放量见表

4。天然草原 (SB-F、LC-F、LC-UM) 2012 年结实期的日均 CO₂ 排放量要显著的低于 2011 年结实期和 2012 年开花期。一方面 2012 年结实期除 SB-F 样地外, 其他样地的观测中天气状况较差, LC-F 样地和 LC-UM 样地观测时出现零星降雨、阴天、多云等天气, 气温与土壤温度均低于 2011 年结实期; 另一方面由于观测前 10 天呼伦贝尔草原无降水发生, 导致整个草原结实期的地上生物量低于往年, 较低的水分和温度共同造成了天然草原 CO₂ 排放量低于 2011 年结实期和 2012 年开花期。LC-F 与 SB-F 样地在 2012 年各主要物候期的地上生物量无显著性差异 ($F=0.071$, $P=0.798$, $n=5$), 而不同物候期 LC-F 样地的 CO₂ 排放量均高于 SB-F 样地, 并且 2012 年开花期达到了显著性水平 (表 3), 其

表 4 呼伦贝尔草甸草原 CH₄ 日均吸收通量及生态系统日均呼吸速率Table 4 Daily mean of CH₄ flux and ecosystem respiration rate from Hulunbuir meadow grassland

观测期	样地	CH ₄ 通量/ $\mu\text{gCm}^{-2}\text{h}^{-1}$				生态系统呼吸速率/ $\text{mgCm}^{-2}\text{h}^{-1}$	
		日均通量		昼均通量平均值	夜均通量平均值	平均值	标准误差
		平均值	标准误差				
SD11	SB-G	-95.96	28.57	-94.98	-97.34	146.81	22.78
	SB-F	-77.55	27.35	-77.95	-76.98	160.86	21.99
	LC-G	-66.47	16.19	-69.69	-61.97	202.87	18.97
	LC-F	-50.74	28.50	-47.60	-55.14	218.09	35.94
	LC-M	-36.16	23.02	-39.03	-32.15	257.99	50.70
	LC-UM	-91.82	34.52	-97.98	-83.20	206.18	44.55
FR12	SB-G	-46.84	8.89	-45.16	-50.20	165.66	42.47
	SB-F	-23.98	6.40	-22.19	-26.97	115.66	17.71
	LC-G	-40.91	9.13	-41.09	-40.55	163.15	39.96
	LC-F	-36.51	7.92	-35.32	-38.89	137.79	12.19
	LC-M	-67.96	17.33	-68.28	-67.32	129.21	23.49
	LC-UM	-80.47	17.39	-80.17	-81.08	156.22	26.10
SD12	SB-G	-33.37	10.64	-20.50	-51.38	32.62	9.70
	SB-F	-43.52	10.56	-30.36	-61.94	61.40	15.25
	LC-G	-26.76	7.15	-27.08	-26.69	83.77	23.76
	LC-F	-38.46	2.75	-33.51	-45.39	75.37	26.39
	LC-M	-53.38	7.45	-45.58	-64.30	57.67	10.80
	LC-UM	-70.48	17.58	-59.07	-86.46	93.31	14.32

注：昼均通量的计算时间在开花期为 04:00 至 18:00，结实期为 06:00 至 18:00，其余为夜均通量计算时间。

具体原因还有待进一步研究。由表 2 可知，天然草原 CO₂ 的呼吸排放速率的日变化与温度既有显著性相关关系，也存在无显著性相关的现象。这与齐玉春等（2005a）在锡林郭勒典型草原观测到 CO₂ 排放通量的日变化与气温及地表温度显著相关或极显著相关有所不同，说明呼伦贝尔草原植被 CO₂ 排放速率的日变化可能还受到温度之外的其他因子的影响。

3.2 不同人类活动对 CH₄ 通量和土壤植物系统呼吸 CO₂ 排放速率的影响

3.2.1 不同人类活动对 CH₄ 通量日变化的影响

自由放牧和刈割影响下呼伦贝尔草甸草原 CH₄ 通量的日变化仍然没有明显的规律（图 1），就不同观测时期日均 CH₄ 吸收通量而言，自由放牧条件下的贝加尔针茅草甸草原（SB-G 样地）和羊草草甸草原（LC-G 样地）的对比顺序均为 SD11 > FR12 > SD12（表 4），而刈割条件下的羊草草甸草原（LC-M 样地）的对比关系则为 FR12 > SD12 > SD11。除 LC-M 样地外，其他观测点 2012 年结实期的日均 CH₄ 吸收通量均低于 2011 年结实期的，2012 年结实期观测前 10 天一直无降水，导致 2012 年结实期观测日 10 cm、20 cm 土壤水分日均值显

著的低于 2011 年结实期（ $F=6.115$ ， $p=0.033$ ， $n=12$ ； $F=5.626$ ， $p=0.039$ ， $n=12$ ），土壤表层较低的水分和温度限制了土壤微生物的活性和甲烷向土壤中的扩散（齐玉春等，2002a），从而造成较低 CH₄ 吸收通量。表 2 的统计分析结果表明，除 2012 年结实期 SB-G 样地及 2012 年开花期 LC-G 样地的 CH₄ 通量分别与 10 cm、20 cm 土壤温度存在显著的相关关系外，其他时期自由放牧样地的 CH₄ 通量与温度均不相关。而 3 次日变化观测中，LC-UM 样地仅在 2012 年结实期的 CH₄ 通量与 20 cm 土壤温度存在显著性相关关系；通过表 4 分析自由放牧和刈割影响下草原土壤吸收 CH₄ 的昼均、夜均通量，发现各样地不同时期的昼均通量与夜均通量之间无显著性差异（ $F=0.182$ ， $p=0.676$ ， $n=9$ ），这与封育后呼伦贝尔天然草原的研究结果一致。

3.2.2 不同人类活动对土壤植物系统呼吸 CO₂ 排放速率的影响

自由放牧条件下贝加尔针茅草甸草原与羊草草甸草原（SB-G、LC-G 样地）在 2011 年结实期和 2012 年开花期的 CO₂ 排放有显著的日变化特征，即在 04:00 至 06:00 开始上升，在 12:00 至 14:00 达到最高排放，其后 CO₂ 排放通量则不断降低。同样由

于阴天以及零星降雨等天气原因使放牧样地在 2012 年结实期观测的 CO₂ 排放无明显日变化规律。而刈割影响下的羊草草甸草原 (LC-M 样地) 除 2012 年结实期的 CO₂ 排放通量在 10:00 达到最低, 而后不断升高至 20:00 达到最高排放; 其他时期则与自由放牧样地的变化形式相似。

三个观测时期人类活动影响下草原的 CO₂ 排放量变化范围分别为: 146.81±22.78~257.99±50.70 mgCm⁻² h⁻¹ (SD11); 115.66±17.71~165.66±42.47 mgCm⁻² h⁻¹ (FR12); 32.62±9.70~93.31±14.32 mgCm⁻² h⁻¹ (SD12)。除 SB-G 样地外, LC-G、LC-M 样地均表现出与天然草原一致的规律, 即不同时期的 CO₂ 排放速率对比关系为 SD11>FR12>SD12。分析自由放牧样地和刈割样地 CO₂ 排放速率与温度的相关关系 (表 2), 发现其与天然草原的结果一致。

3.3 人类活动对呼伦贝尔草甸草原 CH₄ 吸收通量和 CO₂ 净排放的影响

3.3.1 人类活动对呼伦贝尔草甸草原 CH₄ 净吸收通量的影响

与天然草原样地相比, 自由放牧样地分别在 2011 年结实期和 2012 年开花期增强了草原土壤对 CH₄ 的吸收 (表 4), 其中贝加尔针茅草甸草原对 CH₄ 的吸收增加 23.75% 和 95.35%, 而羊草草甸草甸草原则增加了 31.00% 和 12.05%。SB-F 和 LC-F 样地自 2006 年封育至今, 其地表常年覆盖有较厚的凋落物层并且枯死的植物残体仍根植于土壤中, 枯死植物残体的存在降低了地面风速, 而凋落物层则更进一步减弱了地气之间的气体交换, 从而间接降低了封育草原土壤对 CH₄ 的氧化强度, 这与齐玉春等 (2004) 在锡林郭勒草原观测到在植物生长季放牧促进了土壤 CH₄ 的氧化吸收是一致的。但我们的观

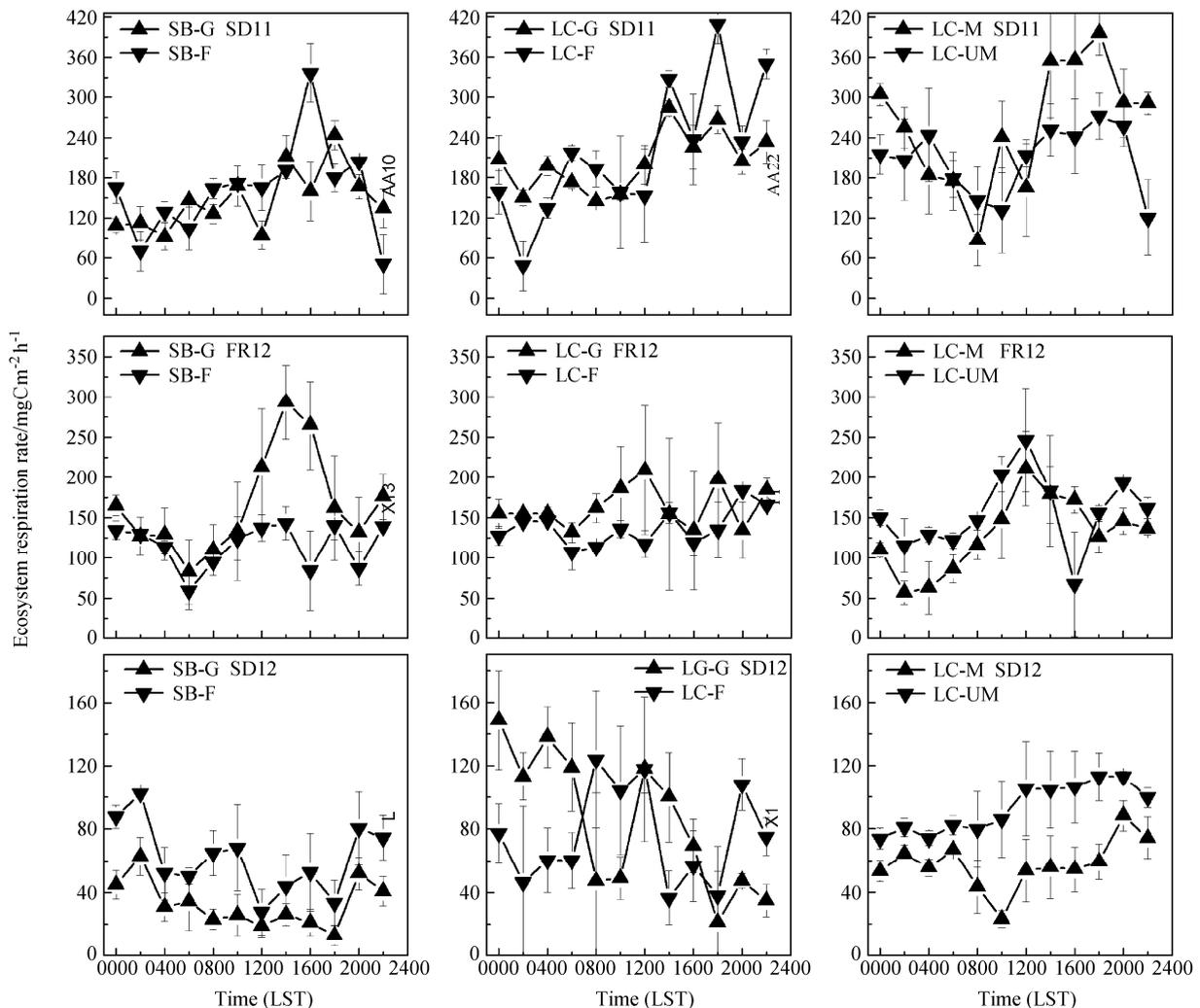


图2 呼伦贝尔草原土壤植物系统呼吸速率的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of ecosystem respiration rate in Hulunbuir meadow grassland

测发现 2012 年结实期封育样地的日均 CH_4 吸收通量则高于放牧草原, SB-G 和 LC-G 样地分别比对应的封育样地低 30.43%和 23.32%。究其原因可能是自由放牧样地的土壤水分较低引起的, 因牲畜采食, 导致放牧草地地表植被相对围栏封育样地矮小稀疏, 夏季在长时间无降水过程发生时, 地表水分更易蒸发丧失, 而牲畜行走践踏导致土壤结构发生变化, 土壤紧实度增强土壤过于干燥不利于土壤微生物的活性而孔隙度减少也不利于气体扩散。2012 年结实期的观测日 SB-G 和 LC-G 样地的 10 cm 土壤水分含量分别为 9.65%和 8.98%, 而同期的封育样地的 10 cm 土壤水分含量分别是 22.69%和 16.09%, 在连续无降水事件发生的情况下放牧行为对贝加尔针茅和羊草草甸草原草原土壤水分的影响显著 ($F=640.930, p=0.000; F=117.288, p=0.000$)。土壤水分是制约土壤微生物生长与代谢的重要因素, 较低的土壤水分可能是造成自由放牧样地的 CH_4 氧化菌的生物活性低于封育样地。

本研究中刈割方式为三年一割, 并于 2009 年 8 月完成了刈割。与一年一割的刈割方式相比, 三年一割在一定程度上保证了植物残体及凋落物等有机质的回归, 保证了植物和土壤微生物的生长所需的营养成分, 2012 年呼伦贝尔草原各主要物候期 LC-M 和 LC-UM 样地的地上生物量并没有显著性差异 ($F=0.009, p=0.936, n=5$)。但我们发现不同物候期, 刈割行为不同程度地减弱了草地对 CH_4 的吸收 (表 4), LC-UM 样地 CH_4 的吸收通量在不同时期比 LC-M 样地多 153.94% (SD11)、18.41% (FR12)、32.04% (SD12), 这与 Zhang et al. (2012) 在内蒙古多伦地区的典型草原观测发现刈割能够增强草地土壤对 CH_4 的吸收有所不同, 说明不同的刈割方式对草地土壤吸收 CH_4 的影响存在差异, 同时也说明刈割行为对不同草原类型的草地土壤 CH_4 吸收的影响机制也不相同。

3.3.2 人类活动对呼伦贝尔草原碳排放 (以 $\text{CO}_2\text{-C}$ 当量计) 的影响

将 CH_4 日累计吸收量转换为 CO_2 当量计算呼伦贝尔草原日累计碳排放量发现, CH_4 的日累计吸收量在整个日累计碳排放量中所占比例范围为 0.35%~2.62%, 因此 CH_4 对草原日累计碳排放量的影响较小, 呼伦贝尔草原碳排放的主要贡献来自于植物土壤系统的呼吸作用。对比不同观测时期自由放牧对呼伦贝尔草原植物土壤系统日累计碳排

放量的影响 (图 3), 发现 2011 年结实期放牧并未促进呼伦贝尔草原的碳排放, 其中 SB-F 样地和 LC-F 样地的日累计碳排放量分别比对应的放牧样地高 10.05%和 7.76%; 而 2012 年开花期植物生长的最旺盛阶段, 放牧行为促进了呼伦贝尔草原的碳排放, 这或许是因牲畜的采食, 在一定程度上刺激和加速植物的代谢补偿, 导致自由放牧样地 (SB-G、LC-G) 的日累计碳排放量则较对应的封育样地高 42.96%和 18.45%, 至 2012 年结实期, 自由放牧行为对草原日累计碳排放量的影响因草原类型不同出现差异, 对于羊草草甸草原表现为促进作用即 LC-G 样地则比 LC-F 样地高 11.68%, 对于贝加尔针茅草甸草原则表现为减弱了 CO_2 排放 (SB-F 样地较 SB-G 样地高 89.75%)。崔骁勇等 (2000) 及齐玉春等 (2005b) 发现放牧降低了典型草原土壤 CO_2 排放, 然而王跃思等 (2002) 和万运帆等 (2011) 根据锡林郭勒草原和藏北草原的研究结果指出自由放牧或者适宜的放牧强度增加了 CO_2 的排放速率。这种相同的草场管理方式却对碳

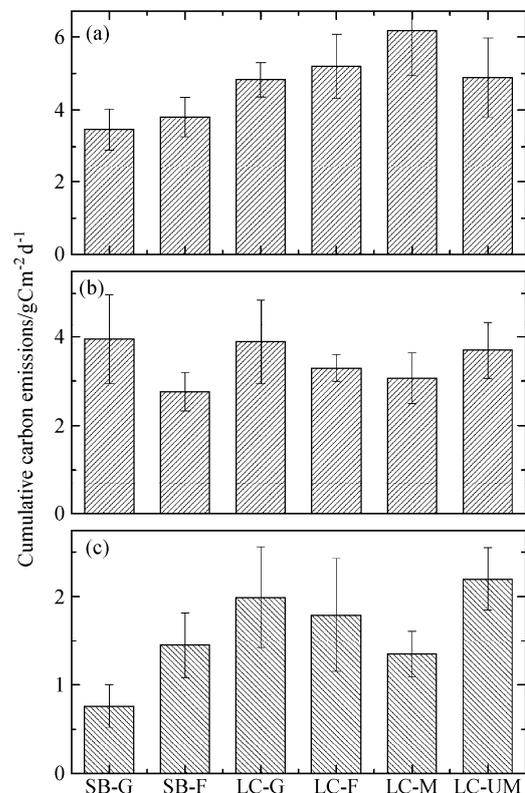


图 3 呼伦贝尔草原日累计碳排放量: (a) SD11; (b) FR12; (c) SD12

Fig. 3 Cumulative carbon emission in Hulunbuir meadow grassland: (a) SD11; (b) FR12; (c) SD12

排放的影响结果不同, 在我们观测地区出现这种观测结果的主要原因可能是因两种草原植被类型被牲畜采食的喜好程度不同, 在同一时期由于羊草作为优质草料更容易被牲畜所采食, 导致羊草植物加强自身代谢补偿, 从而增强了 CO₂ 排放; 而贝加尔针茅并非牲畜的优选食物, 自身代谢补偿相对较少, 不存在放牧刺激 CO₂ 的排放。而刈割条件下, LC-M 样地除 2011 年结实期的 CO₂ 日均累计碳排放量高于 LC-UM 样地外, 2012 年开花期和结实期均低于 LC-UM 样地, 并未促进 CO₂ 排放, 这与郭明英等 (2010) 在与本研究相同地区的研究结果相似。这说明放牧和刈割行为对于草原碳排放的影响受多种环境因子水分、温度等的制约, 同时不同物候期、地上、地下生物量以及土壤呼吸作用等因素都交互影响着草原生态系统的碳排放, 有关放牧和刈割行为对呼伦贝尔草原生态系统碳排放的影响还需从更长的时间尺度进行进一步的试验观测研究, 从而揭示其影响的程度和机制。

4 结论

(1) 呼伦贝尔草原 (封育草原及其对应的放牧和刈割草原) 的 CH₄ 通量的日变化均没有明显的规律, 但都表现为 CH₄ 的汇。封育后天然草原不同观测时期的 CH₄ 汇强的对比顺序为 SD11 > SD12 > FR12, 而自由放牧和刈割影响下草原汇强的对比顺序则为 SD11 > FR12 > SD12; 呼伦贝尔草原的 CH₄ 通量的昼均通量与夜均通量无显著性差异, 加之存在 CH₄ 通量的日变化与不同温度的相关关系不显著的现象, 说明温度对天然草原 CH₄ 通量日变化的响应较为复杂, 草原土壤对甲烷氧化作用的机理仍需进一步研究。

(2) 不同时期呼伦贝尔草原 (封育草原及其对应的放牧和刈割草原) 的土壤植物系统呼吸排放的 CO₂ 日变化规律存在差异; 水分和温度的共同影响造成 2012 年呼伦贝尔草原土壤植物系统呼吸日均 CO₂ 排放量低于 2011 年。放牧和刈割行为在不同时期对呼伦贝尔草原系统呼吸排放的 CO₂ 日变化模式和排放量的影响存在差异。由于放牧行为对不同植被类型的草地 CO₂ 排放量的影响效应各不相同, 因此在评估相同管理措施影响下的不同类型草地碳排放通量时要注意区分其不同的影响效应, 这样对于准确评价和估算我国甚至世界

草地温室气体清单有着重要的科学意义。

(3) 放牧并没有改变 CH₄ 通量的日变化形式; 不同物候期放牧行为对草原 CH₄ 日均吸收通量表现为不同的促进和抑制效果。2011 年结实期和 2012 年开花期放牧样地 CH₄ 日均吸收通量较天然草原多 12.05%~93.35%, 由于土壤水分的限制导致 2012 年结实期放牧草原的 CH₄ 日均吸收通量较封育草原的低 23.32%~30.43%。不同的物候期刈割行为都减弱了草地土壤对 CH₄ 的吸收, LC-M 样地的日均 CH₄ 吸收通量比 LC-UM 样地低 11.55%~60.62%。

(4) 呼伦贝尔草原日均累计碳排放量中 CH₄ 所占比例为 0.35%~2.62%, 而放牧和刈割行为对日均累计碳排放的影响结果在不同观测的物候期以及不同群落类型的草原中有一定的差异性。刈割行为在 2011 年的结实期增强了日均累计碳排放, 而其他物候期均表现为减弱效果。放牧行为对于碳排放的影响在不同物候期, 对不同的植被群落的草原草原的影响 (促进与抑制) 效果并不固定, 受各环境因子, 地上地下生物量以及土壤微生物等多种因素的交互影响, 有关自由放牧和刈割对呼伦贝尔草原生态系统碳排放的影响还需进行更深入和长时间与长周期的原位试验观测研究。

致谢 真诚地感谢中国科学院大学王艳芬教授与中国农业部呼伦贝尔草原站的所有职工在整个观测期间所给予的热心帮助和支持。

参考文献 (References)

- 陈佐忠, 汪诗平. 2000. 中国典型草原生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 9-120. Chen Zuozhong, Wang Shiping. 2000. The Typical Steppe Ecosystems in China(in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 9-120.
- 崔晓勇, 陈四清, 陈佐忠. 2000. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究 [J]. 应用生态学报, 11 (3): 390-394. Cui Xiaoyong, Chen Siqing, Chen Zuozhong. 2000. CO₂ release from typical stipa grandis grassland soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 11 (3): 390-394.
- 董云社, 章申, 齐玉春, 等. 2000. 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, 45 (3): 318-322. Dong Yunshe, Zhang Shen, Qi Yuchun, et al. 2000. Fluxes of CO₂, N₂O, and CH₄ from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation [J]. Chinese Science Bulletin, 45 (3): 318-322.
- 杜睿, 吕达仁, 王庚辰. 2005. 天然温带典型草原 N₂O 和 CH₄ 通量的时间变化特征 [J]. 自然科学进展, 15 (3): 313-320. The temporal variation of N₂O and CH₄ fluxes from native temperate typical grassland[J]. Progress in Natural Science, 15 (3):313-320.
- Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. 1993. Organic carbon in soils of the world [J]. Soil Science Society of America Journal, 57 (1): 192-194.

- 郭明英, 徐丽君, 杨桂霞, 等. 2010. 不同刈割间隔对羊草草甸草原割草地土壤呼吸的影响 [J]. 草原与草坪, 30 (6): 10-14. Guo Mingying, Xu Lijun, Yang Guixia, et al. 2010. Effect of cutting treatment on soil respiration rate of *Leymus chinensis* grassland [J]. Grassland and Turf (in Chinese), 30 (6): 10-14.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Summary for Policymakers. Valencia, Spain. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.
- Kravchenko I K. 2002. Methane oxidation in boreal peat soils treated with various nitrogen compounds [J]. Plant and Soil, 242 (1): 157-162.
- 李博. 1997. 中国北方草地退化及其防治对策 [J]. 中国农业科学, 30 (6): 1-9. Grassland degradation and its control strategies in the North Chinese [J]. Scientia Agricultura Sinica, 30 (6): 1-9.
- O Edenhofer B K, Luderer G, Steckel J, et al. 2010. More heat than light? On the economics of decarbonisation.
- 齐玉春, 董云社, 章申. 2002a. 华北平原典型农业区土壤甲烷通量研究 [J]. 农村生态环境, 18 (3): 56-58. Qi Yuchun, Dong Yunshe, Zhang Shen. 2002a. Methane fluxes of typical agricultural soil in the North China plain [J]. Rural Eco-Environment (in Chinese), 18 (3): 56-58.
- 齐玉春, 董云社, 章申, 等. 2002b. 贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体 N_2O 和 CH_4 排放研究 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 32 (11): 934-941. Qi Yuchun, Dong Yunshe, Zhang Shen, et al. 2002b. Experimental study on N_2O , CH_4 fluxes from the dark coniferous forest zone soil of the Gongga Mountain, China [J]. Science in China: Series D, 32 (11): 934-941.
- 齐玉春, 董云社, 耿元波, 等. 2004. 内蒙古羊草草原不同物候期 CH_4 通量日变化特征与日通量比较 [J]. 地理研究, 23 (6): 785-794. Qi Yuchun, Dong Yunshe, Geng Yuanbo, et al. 2004. The comparison of the CH_4 flux diurnal variation characteristics and diurnal uptake flux in different phenologies in *Leymus Chinense* grassland in Inner Mongolia, China [J]. Geographical Research (in Chinese), 23 (6): 785-794.
- 齐玉春, 董云社, 刘纪远, 等. 2005a. 内蒙古半干旱草原 CO_2 排放通量日变化特征及环境因子的贡献 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 35 (6): 493-501. Qi Yuchun, Dong Yunshe, Liu Jiyuan, et al. 2005a. Daily variation characteristics of CO_2 emission fluxes and contributions of environmental factors in semi-arid grassland of Inner Mongolia, China [J]. Science in China (Series D), 35 (6): 493-501.
- 齐玉春, 董云社, 杨小红, 等. 2005b. 放牧对温带典型草原含碳温室气体 CO_2 、 CH_4 通量特征的影响 [J]. 资源科学, 27 (2): 103-109. Qi Yuchun, Dong Yunshe, Yang Xiaohong, et al. 2005b. Effects of grazing on carbon dioxide and methane fluxes in typical temperate grassland in Inner Mongolia, China [J]. Resources Science (in Chinese), 27 (2): 103-109.
- Risch A C, Frank D A. 2010. Diurnal and seasonal patterns in ecosystem CO_2 fluxes and their controls in a temperate grassland [J]. Rangeland Ecology & Management, 63 (1): 62-71.
- 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 2011. 夏季放牧强度对藏北草原温室气体排放的影响 [J]. 草业科学, 27 (11): 1-6. Wan Yunfan, Li Yue, Gao Qingzhu, et al. 2011. Effect of summer grazing intensity on GHG emission in the North Tibet steppe [J]. Pratacultural Science (in Chinese), 27 (11): 1-6.
- Wang Y S, Wang Y H. 2003. Quick measurement of CH_4 , CO_2 , and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20 (5): 842-844.
- 王跃思, 王迎红. 2007. 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测 [M]. 北京: 科学出版社, 39-62. Wang Yuesi, Wang Yinghong. 2007. Observation of carbon exchange on typical terrestrial ecosystems and freshwater (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 39-62.
- 王跃思, 胡玉琼, 纪宝明, 等. 2002. 放牧对内蒙古草原温室气体排放的影响 [J]. 中国环境科学, 22 (6): 11-15. Wang Yuesi, Hu Yuqiong, Ji Baoming, et al. 2002. Research of grazing effects on greenhouse gas emission in Inner Mongolian grasslands [J]. China Environmental Science (in Chinese), 22 (6): 11-15.
- 王艳芬, 马秀枝, 纪宝明, 等. 2003. 内蒙古草甸草原 CH_4 和 N_2O 排放通量的时间变异 [J]. 植物生态学报, 27 (6): 792-796. Wang Yanfen, Ma Xiuzhi, Ji Baoming, et al. diurnal and seasonal variation in methane and nitrous oxide fluxes in meadow steppe of Inner Mongolia [J]. Chinese journal of Plant Ecology, 27 (6): 792-796.
- 杨允菲, 张宝田. 2005. 松嫩平原贝加尔针茅无性系构件的结构及生长规律北京 [J]. 应用生态学报, 16 (12): 2311-2315. Yang Yunfei, Zhang Baotian. 2005. Module structure and growth pattern of *Stipa baicalensis* clone in Songnen Plain of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 16 (12): 2311-2315.
- Zhang L, Guo D, Niu S, et al. 2012. Effects of mowing on methane uptake in a semiarid grassland in northern China [J]. PLoS ONE, 7 (4): e35952.
- 朱立博, 马伟杰, 王宇. 2001. 呼伦贝尔草原生态环境现状及其保护对策北京 [J]. 21 世纪草业科学展望——国际草业 (草地) 学术大会论文集. Zhu Libo, Ma Weijie, Wang Yu. 2001. Protection measures and ecologic environmental situation of Hulunbuir grassland [J]. The prospect of pratacultural science in twenty-first Century——International grass (grassland) academic conference proceedings.