

DOI: 10.5846/stxb201810172244

张燕江, 邱莉萍, 高海龙, 刘建, 魏孝荣, 张兴昌. 黄土高原半干旱区典型草地生态系统 CO₂ 交换对刈割的响应. 生态学报, 2020, 40(1): 336-344.
Zhang Y J, Qiu L P, Gao H L, Liu J, Wei X R, Zhang X C. Responses of ecosystem CO₂ exchange to clipping in a semi-arid typical grassland on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 336-344.

黄土高原半干旱区典型草地生态系统 CO₂ 交换对刈割的响应

张燕江¹, 邱莉萍^{1,2,*}, 高海龙², 刘建³, 魏孝荣², 张兴昌²

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学动物科技学院, 杨凌 712100

摘要: 草地生态系统碳循环在全球气候变化中扮演着重要的角色。刈割是实现草地资源合理利用的主要管理措施, 但其对草地生态系统碳通量的影响过程和机理尚不清楚。以黄土高原半干旱区典型草地为研究对象, 设计刈割和对照两种处理, 于 2013—2015 年对生态系统碳通量各组分, 土壤温度和水分进行了测定。结果表明: 生态系统碳通量季节性变化均呈明显的单峰模式, 以夏季最高, 春秋季节最低, 但不同组分峰值出现的时间有所不同。刈割使整个试验期土壤呼吸增加了 17%, 但对总初级生产力 (*GEP*)、生态系统呼吸 (*Re*) 和净初级生产力 (*NEE*) 的影响不显著。*GEP* 和 *NEE* 在正常降水年 (2014) 高于干旱年 (2015), 而且其对刈割的响应与降水年型有关。在正常降水年, 刈割后 *GEP* 和 *NEE* 显著减低, 而在干旱年显著增加。这些结果表明, 降水年际变化是造成半干旱草地生态系统碳通量变化的主导因素, 而刈割增大了这一生态系统的土壤碳排放。

关键词: 刈割; 草地; 土壤呼吸; 碳通量; 黄土高原

Responses of ecosystem CO₂ exchange to clipping in a semi-arid typical grassland on the Loess Plateau

ZHANG Yanjiang¹, QIU Liping^{1,2,*}, GAO Hailong², LIU Jian³, WEI Xiaorong², ZHANG Xingchang²

1 College of Nature and Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Grassland ecosystem plays an important role in global climate change. Clipping is an effective management practices to realize the rational utilization of grassland resources. However, the responses of grassland ecosystem CO₂ flux to clipping remain unknown. Here, we conducted a 3-year field experiment in a semi-arid typical grassland on the Loess Plateau to examine the effect of clipping on CO₂ flux. Ecosystem carbon dioxide flux components were measured, as well as soil temperature and moisture at the depth of 0—10 cm. The results showed that the seasonal dynamics of CO₂ flux presented a single peak pattern with the highest values in summer and the lowest values in spring and autumn. There was a slight difference in the timing of CO₂ flux peak. During across experimental period, clipping significantly increased soil respiration (*Rs*) by 17%, but had no significant effects on the gross primary productivity (*GEP*), ecosystem respiration (*Re*), and net ecosystem carbon absorption (*NEE*). The *GEP*, *Re*, and *NEE* in normal rainfall year (2014) were higher than those in dry year (2015). The response of the *GEP* and the *NEE* to clipping depended on rainfall type. There was a significant

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271315, 41471244, 41571130082)

收稿日期: 2018-10-17; 网络出版日期: 2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiu lp79@163.com

increase of the *GEP* and the *NEE* in dry year after clipping, while an opposite trend was found in normal rainfall year. These results suggested that CO₂ flux were mainly determined by the inter-annual rainfall in the semi-arid grassland ecosystems, and clipping could increase the soil CO₂ emission.

Key Words: clipping; grassland; soil respiration; carbon flux; Loess Plateau

草地生态系统与大气的碳交换决定着草地的生产力,并对碳平衡有重要影响,包括土壤呼吸(*R_s*, soil respiration),生态系统呼吸(*R_e*, ecosystem respiration)和光合 3 个过程。土壤呼吸是土壤产生并向大气释放 CO₂ 的代谢作用^[1],是陆地碳收支中最大的通量,约占全球 CO₂ 交换量的 25%^[2]。净生态系统 CO₂ 交换(*NEE*, net ecosystem carbon exchange)是生态系统总初级生产力(*GEPG*, gross primary productivity)和生态系统呼吸平衡的结果^[3],约为总初级生产力的 20%^[4]。随着气候变化和人为活动的加剧,生态系统碳平衡被打破,导致净生态系统 CO₂ 交换降低^[5],土壤呼吸释放出更多的 CO₂^[6]。草地作为世界上分布最广的植被类型之一,大约储存着全球碳总量的 1/5^[7],在调节气候变化中扮演着重要角色,已成为减缓全球气候变化的主要研究内容^[8]。目前,草地生态系统碳通量各组分季节性变化特征及其与环境因子之间关系的研究已受到广泛关注^[9-11],但在刈割条件下,黄土高原半干旱区典型草地生态系统碳循环过程及其影响因子的研究较少。

黄土高原半干旱区典型草地是我国主要的草地生态系统之一,受过度放牧及人类生产活动的干扰,草地退化十分严重^[12-13]。近年来,随着草地封育与植被重建措施的实施,该区退化草地得到明显恢复,面积已达 6×10⁷ hm²,占该区土地面积的 32.6%^[14]。黄土高原属典型的干旱及半干旱气候,降雨年际差异大、季节性分布不均,该区草地生态系统碳交换对气候变化的响应非常敏感。为提高草地生产力,实现草地资源合理利用,保障生态效益最大化,选择适当的草地管理措施已成为促进草地生态系统可持续发展的关键。刈割作为草地生态系统合理利用的主要措施之一,对生态系统的结构及功能具有一定的调节作用^[15-17]。有研究表明刈割可使高草草原土壤呼吸降低 19%—49%^[18-20],而 Jia 等^[21]和 Han 等^[22]发现刈割对我国黄土高原和内蒙古草地的土壤呼吸没有影响,这表明刈割对土壤呼吸的影响与气候条件有关,因此,需要深入分析刈割和气候条件的交互作用。此外,作为生态系统碳通量的重要组成部分,*GEP*、*R_e* 和 *NEE* 对刈割响应方面的研究比较少,限制了我们对草地生态系统碳循环过程及其对气候变化反馈的认识。

本研究以宁夏回族自治区固原市云雾山国家级自然保护区围封 30 年的典型草地为对象,设计刈割和对照处理,对土壤呼吸、总初级生产力、生态系统呼吸和净生态系统 CO₂ 交换进行了 3 年的测定,以确定刈割对生态系统碳通量各组分的影响及其与温度和水分的关系,为黄土高原典型草地碳循环的预测及草地生态系统的管理提供科学依据。

1 材料及方法

1.1 研究区概况及试验设计

研究区位于宁夏回族自治区固原市云雾山国家级自然保护区(106°24′—106°28′ E, 36°13′—36°19′ N),海拔 1800—2148 m,面积约为 6000 hm²。该区为黄土高原典型的半干旱草地生态系统,属暖温带半干旱季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热少雨,多年平均降雨量为 425 mm,7—9 月降水占年总量的 65%,年均气温 6.9℃,月均温最高可达 22℃(7 月),最低为-14℃(1 月)。土壤类型为黄土母质上发育而成的黑垆土和山地灰褐土,土层分布均匀且深厚。植被以旱生草本植物为主,建群种包括长芒草(*Stipa bungeana*)、大针茅(*S. grandis*)、铁杆蒿(*Artemisia vestita*)、百里香(*Thymus mongolicus*),伴生物种有猪毛蒿(*A. scoparis*)、赖草(*Leymus secalinus*)、星毛委陵菜(*Potentilla*)等^[23-24]。

在 30 年禁牧草地内选取地势相对平坦且植被类型相对一致的地段,设计刈割和未刈割 2 种处理,每种处理 3 次重复,共 6 个小区完全随机排列,小区面积为 20 m²(4 m × 5 m),间隔为 2 m。刈割是在每年秋季植物

枯萎后将小区内所有植物齐地面收割并移出小区,未刈割为对照。

1.2 测定项目和方法

碳通量采用 LI-840 红外线分析仪 (LI-COR, Lincoln, USA) 结合密闭式气室法测定。测定前在每个小区随机永久布置 2 个直径 20 cm 的 PVC 环和 2 个 0.5 m × 0.5 m 的 PVC 框作为测定基座,将其一端砸入土壤 5 cm,另一端露出地表 7 cm。在 2013 年 7—9 月、2014 和 2015 年 5—9 月,选择晴朗的天气,在 9:00—11:00 进行 R_s 、 R_e 、 NEE 的测定,每个月测定 3—5 次。 R_s 观测时,将直径 20 cm,高 50 cm 气体收集罩置于 PVC 环上,保持整个空间密闭,待数据稳定后,开始记录并保存数据,测定时长 120 s。 NEE 的测定是在 R_s 测定结束并将气室更换为 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m 的透明有机玻璃箱后进行。将玻璃箱放置在 PVC 框上,保持空间密闭,连续测定 CO_2 浓度,待 CO_2 浓度趋于稳定变化后,记录并保存 120 s 内的测定数据。 NEE 测定结束后,抬起箱子使其内部气体与外界大气充分交换,将其再次放置在 PVC 框上并迅速用不透明黑布遮盖箱体以阻挡光线,当 CO_2 浓度开始稳定上升时,开始记录数据且持续 120 s,此时测定结果为 R_e 。 GEP 根据 NEE 和 R_e 两者的差值进行计算。两气室内顶端均安装两个小风扇和一个测定箱内气体温度的温度传感器。

太阳辐射、空气温度、0—10 cm 土壤温度和土壤水分由微气象系统直接观测,2 秒 1 次,每 10 min 计算 1 个均值,所有数据保存在数据采集器 (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, USA) 中。根据样地气象站观测数据 (图 1),该区 2013—2015 年降雨量分别为 410 mm、450 mm 和 230 mm,与多年平均降雨量 (425 mm) 相比,2013 年和 2014 年为正常降雨年,而 2015 年为干旱年。

采用以下公式对生态系统碳通量各组分 (R_s , NEE 和 R_e) 进行计算,具体方法见^[25-26]。

$$F = \frac{V \times P_{av} \times (1000 - W_{av})}{R \times S \times (T_{av} + 273)} \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为 CO_2 通量组分 (R_s , NEE 和 R_e , $\mu mol m^{-2} s^{-1}$); V 是气室体积 (m^3); P_{av} 为大气压强 (kPa); W_{av} 是水汽分压 (mmol/mol); R 为理想气体常数 ($8.314 J mol^{-1} K^{-1}$); S 表示气室表面积 (m^2); T_{av} 为箱室内气温 ($^{\circ}C$); dc/dt 为气室内 CO_2 浓度随时间变化的斜率。

总初级生产力 (GEP) 计算公式为: $GEP = -NEE + R_e$ (2)

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件对数据进行分析 and 作图。

2 结果

2.1 土壤温度和水分的变化

受大气温度的影响,两种处理土壤温度在各生长季均呈显著的单峰模式,以夏季最高,春秋季节最低 (图 2),但其峰值出现的时间与大小在年际间有所不同,2013 和 2014 年其峰值均出现在 8 月中旬,其值分别为 (24.6 ± 1.0) $^{\circ}C$ 和 (23.6 ± 1.0) $^{\circ}C$,而 2015 年峰值出现在 7 月下旬 (21.6 ± 1.5) $^{\circ}C$ 。刈割、测定年度和两者交互作用对土壤温度的影响不显著 (表 1)。土壤水分季节性波动非常显著 (图 2):在 2013 年 7 月中旬最高,之后呈缓慢下降的趋势;2014 年 4 月下旬和 10 月上旬分别出现 2 个峰值 ($20.4\% \pm 3.7\%$ 和 $24.8\% \pm 2.1\%$),5—10 月呈现出波动上升的趋势;2015 年全年最高值出现在 5 月 ($22.2\% \pm 1.9\%$),而 7—9 月受长期干旱及间歇性大降雨事件的影响,土壤水分在较高的范围内剧烈波动。刈割对土壤水分的影响与测定年度有关,2013 年刈割使土壤水分显著提高了 30% (表 2),而在 2014—2015 年土壤水分不受刈割的影响,但受测定年度的影响

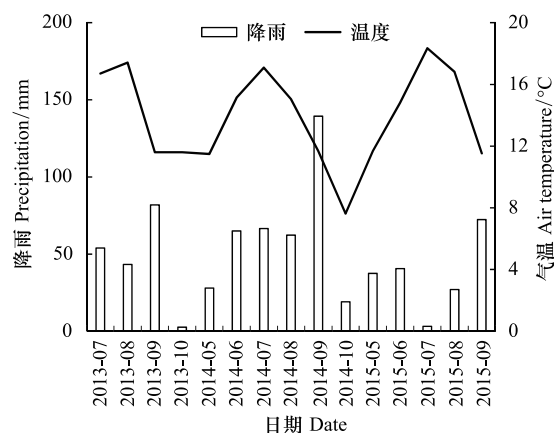


图 1 实验期间降雨量 (柱) 及月平均气温 (线) 的变化

Fig.1 Variations in monthly precipitation (columns) and mean air temperature (solid line) during experimental period

(表 1), 与 2014 年相比, 在 2015 年土壤水分显著降低了 17.68%。

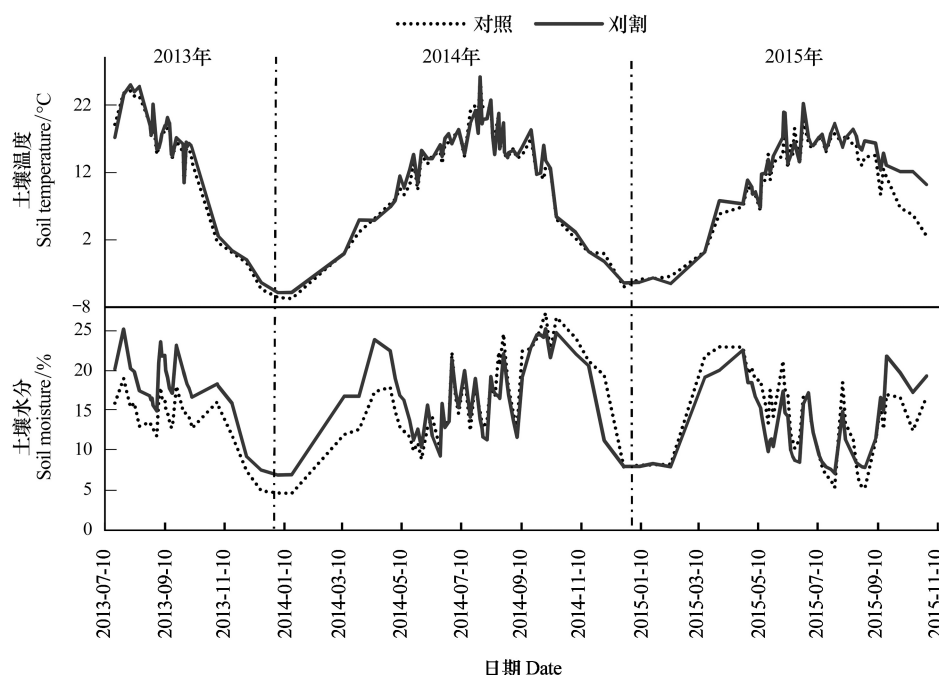


图 2 2013 年 7 月至 2015 年 10 月间 0—10 cm 日均土壤温度及水分的季节性变化

Fig.2 Seasonal variation in daily mean soil moisture and temperature at 0—10 cm depth under different treatments from July 2013 to October 2015

表 1 刈割与测量时间(年)对土壤温度、土壤水分及生态系统 CO₂ 通量各组分影响的双因素方差分析结果

Table 1 A two-ANOVA results of clipping and year effects on soil temperature, soil moisture, and ecosystem CO₂ flux components

时间 Time	因子 Factors	<i>df</i>	土壤温度 <i>T</i>	土壤水分 <i>M</i>	土壤呼吸 <i>Rs</i>	总初级 生产力 <i>GEP</i>	生态系统 呼吸 <i>Re</i>	净碳交换 <i>NEE</i>
2013—2015	CL	1	0.2329	0.0954	0.0022	0.0613	0.0337	0.2661
	Y	1	0.2317	<0.0001	0.4198	<0.0001	0.0005	<0.0001
2014—2015	CL	1	0.3281	0.9772	0.0015	0.7563	0.0886	0.0692
	Y×CL	1	0.1245	0.2859	0.0878	0.0052	0.3878	0.0006

CL: 刈割 Clipping; *T*: 土壤温度 Soil temperature; *M*: 土壤体积含水量 Contents of volumetric moisture; *Rs*: 土壤呼吸 Soil respiration; *GEP*: 总初级生产力 Gross primary productivity; *NEE*: 净生态系统 CO₂ 交换 (负值表示固定 CO₂) Net primary productivity; *Re*: 生态系统呼吸 Ecosystem respiration; Y: 年 Year

2.2 生态系统碳通量各组分的变化

草地生态系统碳交换通量呈现出显著的季节变化特征(图 3)。生态系统 *Rs*、*GEP*、*Re* 和 *NEE* 在整个生长季均呈现出单峰曲线的变化模式, 以夏季最高, 春秋季节最低, 但其峰值出现的时间因碳交换组分的不同而异(图 3)。土壤和生态系统呼吸在 3 个测定年度均以 7 月下旬最高, 其值在 2013、2014 和 2015 年分别为 (4.0 ± 0.1) 和 (6.7 ± 1.0) 、 (4.8 ± 0.9) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 (9.9 ± 0.8) 、 (3.6 ± 0.3) 和 (8.7 ± 0.5) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。*GEP* 和 *NEE* 在生长季峰值出现的时间则与测定年度有关, *GEP* 的峰值在 3 个年度分别出现在 8 月中旬 ((14.2 ± 3.8) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、7 月上旬 ((18.6 ± 3.8) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 和 6 月中旬 ((13.6 ± 3.5) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 而 *NEE* 的峰值则分别出现在 9 月中旬 ((-7.9 ± 3.8) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、6 月上旬 ((-11.5 ± 1.6) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 和 6 月下旬 ((-7.5 ± 4.1) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

表 2 刈割及对照对土壤温度水分及生态系统 CO₂ 通量各组分的影响Table 2 Average value of soil moisture and temperature, ecosystem CO₂ flux under different treatments

项目 Items	处理 Treatments	均值 Mean	2013	2014	2015
温度	CK	15.548±0.41a	18.719±0.66a	14.508±0.71Aa	14.312±0.52Aa
T/℃	CL	16.199±0.41a	19.297±0.69a	14.85±0.66Aa	15.359±0.59Aa
体积含水量	CK	14.934±0.47a	14.997±0.36b	17.495±0.78Aa	12.071±0.77Ba
M/%	CL	16.137±0.53a	19.411±0.71a	17.884±0.78Aa	11.760±0.73Ba
土壤呼吸	CK	2.395±0.10b	2.970±0.16b	1.993±0.19Ab	2.405±0.12Ab
Rs/(μmol m ⁻² s ⁻¹)	CL	2.817±0.09a	3.109±0.13a	2.784±0.19Aa	2.636±0.12Aa
总初级生产力	CK	12.122±0.43a	13.409±0.43a	14.131±0.76Aa	8.946±0.56Bb
GEP/(μmol m ⁻² s ⁻¹)	CL	11.086±0.35a	8.938±0.54b	12.659±0.6Aa	10.967±0.48Aa
生态系统呼吸	CK	5.957±0.21a	5.487±0.32a	6.827±0.4Aa	5.351±0.29Ba
Re/(μmol m ⁻² s ⁻¹)	CL	5.360±0.18a	4.826±0.26a	5.978±0.34Aa	5.082±0.28Ba
净生态系统碳交换	CK	-6.165±0.31a	-7.922±0.31a	-7.303±0.5Aa	-3.595±0.39Bb
NEE/(μmol m ⁻² s ⁻¹)	CL	-5.726±0.25a	-4.111±0.45b	-6.682±0.37Aa	-5.885±0.4Ba

每列不同小写字母表示处理之间具有显著性差异,每行不同大写字母表示年际间具有显著性差异($P < 0.01$)

本研究中,土壤呼吸不受测定年度的影响,在 2014、2015 年的平均值分别为 $(2.3 \pm 0.6) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $(2.5 \pm 0.6) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (表 2),但受刈割的影响($P = 0.0015$),而且刈割与测定年度之间的交互作用接近显著水平($P = 0.0878$)。刈割使土壤呼吸在 2014 年度增加最大(40%, $P = 0.032$),在 2013 和 2015 年度增加较小(5%和 8%, $P = 0.5080$ 和 0.2291)。生态系统呼吸在 2014 年度显著高($(6.4 \pm 1.3) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)于 2015 年度($(5.2 \pm 1.5) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)($P = 0.0005$)。刈割降低了生态系统呼吸($P = 0.0886$),而且这种降低在 2014 年度较大(12.4%),在 2015 年度较小(5%)。

生态系统总初级生产力和净气体交换呈现出显著的年际变化特征($P < 0.0001$),而且受测定年度和刈割交互作用的影响($P = 0.0052$ 和 0.0006)。总初级生产力和净气体交换量在正常降水年(2014)显著高于干旱年(2015),其值分别为 (13.3 ± 3.0) 和 (-6.9 ± 2.4) 、 (9.9 ± 2.7) 和 $(-4.7 \pm 1.8) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。刈割后总初级生产力和净气体交换量在正常降水年显著降低,但是在干旱年显著增加。如刈割后总初级生产力和净气体交换量在 2013 年分别降低了 33%($P < 0.001$)和 38%($P < 0.001$),在 2014 年分别降低了 10%($P = 0.2422$)和 8%($P = 0.5253$),在 2015 年则增加了 22%($P = 0.013$)和 63%($P = 0.0002$)。

2.3 生态系统碳通量各组分与土壤温度和水分的关系

整个实验期间,草地生态系统土壤温度与 R_s 、 GEP 和 Re 的相关性均显著($P < 0.01$),而与 NEE 的相关性不显著($P = 0.676$)。利用线性模型和指数模型分别对不

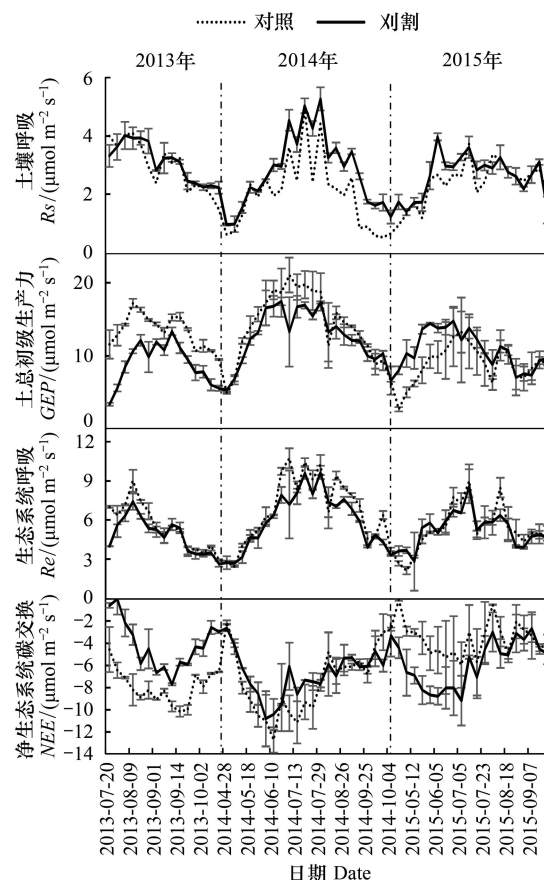


图 3 2013 年 7 月至 2015 年 10 月间生态系统 CO₂ 通量各组分
的季节性变化

Fig.3 Seasonal variation in ecosystem CO₂ flux through July
2013 to October 2015 of each treatments

R_s : 土壤呼吸 Soil respiration; GEP : 总初级生产力 Gross primary productivity; NEE : 净生态系统 CO₂ 交换 (负值表示固定 CO₂) Net primary productivity; Re : 生态系统呼吸 Ecosystem respiration

同处理条件下各组分与土壤温度的关系进行拟合(表 3),发现指数模型对 R_s 和 R_e 与温度的拟合关系较好,土壤温度分别解释了 R_s 和 R_e 季节性变化的 31%—46% 和 39%—56%。基于线性和指数模型对土壤温度与 GEP 和 NEE 的拟合不显著,决定系数均在 20% 以下。土壤水分与 R_s 、 GEP 、 R_e 和 NEE 的二次函数和线性拟合也不显著,决定系数在 10% 左右(未列出)。

Table 3 生态系统通量各组分与土壤温度的回归分析

Table 3 The regression analysis between soil temperature and ecosystem CO₂ flux components

	$R_s = a \times e^{b \times T}$						RMSE	R^2	P
	a	$SE(a)$	b	$SE(b)$	Q_{10}	$SE(Q_{10})$			
CK+CL	0.6503	0.0948	0.0806	0.0057	2.2395	0.1287	0.3800	0.46	0.0010
CK	0.6091	0.1750	0.0864	0.1180	2.3734	2.8006	0.4900	0.31	0.0001
CL	1.1310	0.1020	0.0565	0.0056	1.7599	0.0985	0.3925	0.39	0.0001
	$R_e = a \times e^{b \times T}$						RMSE	R^2	P
	a	$SE(a)$	b	$SE(b)$	Q_{10}	$SE(Q_{10})$			
CK+CL	2.1067	0.7040	0.0633	0.0056	1.8838	0.1054	0.2930	0.44	0.0010
CK	1.8806	0.0928	0.0758	0.0026	2.1341	0.0554	0.2600	0.56	0.0001
CL	2.2114	0.1006	0.0557	0.0064	1.7459	0.1117	0.3059	0.39	0.0001

RMSE: 均方根误差 Root mean square error; Q_{10} : 温度敏感性 Temperature sensitivity (Q_{10}); $SE(Q_{10})$: 标准误差 Standard error for Q_{10} , $SE(Q_{10}) = Q_{10} \times 10 \times SE(b)$

3 讨论

3.1 生态系统碳通量各组分的年季变化及其影响因素

生态系统碳通量各组分均呈显著的季节性变化特征,这与大多数的研究结果一致^[27-29]。土壤温度和水分是引起碳通量季节性变化的主要原因^[8,22]。本研究中,与土壤水分相比,土壤温度很好地解释了 R_s 和 R_e 的季节性变化,表明在该草地生态系统中土壤温度是引起 R_s 和 R_e 季节性变化的主要原因。与 R_e 和 R_s 不同的是,土壤温度和水分对 NEE 和 GEP 季节性变化的解释度均不高,其原因可能是 NEE 和 GEP 的季节性变化不仅与土壤温度和水分有关,同时也受到光合有效辐射和叶面积指数等多种因子的影响^[30-31]。因此,该生态系统碳通量季节性变化的影响因子与碳通量组分有关,土壤呼吸和生态系统呼吸的季节性变化主要由土壤温度决定。

R_s 和 R_e 的峰值出现在 7—8 月,这与大多数的研究结果一致^[19,21],且与土壤温度峰值出现的时间大致相吻合,证明了土壤温度是调节 R_s 和 R_e 季节变化的主要因子。有研究表明 NEE 最大值发生在植物生长旺盛期(8 月)且与 GEP 显著相关^[32]。本研究中 GEP 和 NEE 峰值出现的时间并不同步,且在不同生长季差异很大。适宜的气象条件是植被生长的关键,2013 年降雨主要集中在 8 月,较好的水热条件有利于植物快速生长,使 GEP 达到峰值,但 NEE 的最大值却滞后于 GEP 。2014 和 2015 年生长季前期发生的大降雨事件有利于植物快速返青并积累有机物,使 GEP 和 NEE 的峰值提前出现,在干旱年更加明显。这些结果表明降雨的季节分布是引起 GEP 和 NEE 季节性变化的主要原因。这与 Pierre 和 Smith^[33]发现的由于植物在不同生长阶段对水分的需求不同,生长季特定时期的降水量对生态系统过程的影响大于年降雨量这一观点基本吻合。此外,在干旱和半干旱草地生态系统,降水量和土壤水分有效性是植被生产力的主要限制因子^[34],降雨引起生物量变化驱动的 RE 、 GEP 和 NEE 与年降雨量有关^[35],干旱导致 GEP 和 NEE 降低^[36]。如在本研究中,2015 年是典型的干旱年,降水量仅为 2014 年的 50%,生长季长期缺水限制了植物的生长,降低了生物量,从而使 RE 、 GEP 和 NEE 在干旱年显著低于正常降水年。

3.2 刈割对生态系统碳通量各组分的影响

刈割是草地生态系统的主要管理措施之一,可通过降低枯落物向微生物的底物供应和光合产物向根系的

输送^[37],改变群落结构^[15]、植物群落补偿性生长^[38]和土壤环境等多种直接和间接因素影响生态系统碳通量过程。

本研究结果与郭明英等^[39]、Bremer 等^[18]发现的刈割使土壤呼吸降低这一结论不一致。这种差异可能与不同生态系统土壤温度和水分对刈割的不同响应有关。土壤温度是影响酶和微生物活性、植物生长和有机质分解的关键,对土壤呼吸具有重要作用^[40]。增温可激发微生物及其酶活性、加快凋落物和有机质的分解^[41],促进地上生物量的生长^[42],从而增大土壤呼吸。土壤水分亦可通过改变土壤中溶解性有机碳的含量和迁移能力,影响微生物的利用效率,进而改变土壤呼吸^[43]。在受水分限制的生态系统中,随着土壤水分的增加,土壤呼吸显著增加^[44]。因此,本研究中,刈割后较高的土壤温度和水分可能是引起土壤呼吸增大的主要原因。此外,在 2014 年,刈割对土壤呼吸的影响最为显著,其原因可能是:在降雨充沛年,刈割可极大地促进植物的生长,增加组成群落的物种数量^[15],甚至引起部分植物的超补偿生长^[38],使土壤呼吸进一步提高。

刈割对 *GEP* 和 *Re* 的影响共同决定了 *NEE* 对刈割的响应。本研究中,*NEE* 与 *GEP* 显著正相关(对照: $NEE = 1.48 - 0.63 \times GEP$, $R^2 = 0.78$, $P < 0.0001$;刈割: $NEE = 1.18 - 0.62 \times GEP$, $R^2 = 0.47$, $P < 0.0001$),而与 *Re* 相关性不显著(R^2 为 0.11—0.06),表明在两种处理下 *NEE* 的变化主要受到 *GEP* 的直接调控,这一结果与张素彦等^[45]发现的典型草地生态系统 *NEE* 主要取决于 *GEP* 的结论相吻合,而与初小静和韩广轩^[46]对中国湿地草地生态系统 *NEE* 受 *ER* 影响的观点不符,这种差异可能与气候、生态系统类型和土地利用方式有关。在测定期间,刈割增大了 *Re*,但其对 *GEP* 和 *NEE* 的影响则与降雨年型有关,干旱年为增,正常降雨年为减。这可能与降雨年型和刈割对植被群落结构组成及生长的交互作用有关。不同功能群物种对 *GEP* 和 *NEE* 贡献差异很大^[47],刈割可通过去除土壤表层覆盖物改变土壤环境,使对土壤水分、温度和光照需求较低的物种类型显著增大^[15],从而改变 *GEP* 和 *NEE* 的变化方向和尺度。正常降雨年长芒草主导了碳交换过程,刈割抑制了长芒草的生长,而干旱年长芒草的生长受到限制,其主导的 *GEP* 和 *NEE* 降低,刈割样地内耐旱性植被具有较高的水分利用性,其在干旱年生长旺盛,成为主导碳交换的植被类型,进而使 *GEP* 和 *NEE* 对刈割的响应出现年际差异。因此,刈割对 *GEP* 和 *NEE* 的影响主要取决于不同植被类型对降雨模式的不同响应。

4 结论

本文在不同降雨年型下研究了刈割对生态系统碳通量各组分的影响。结果表明,降雨年际变化是引起 *GEP*、*Re* 和 *NEE* 年际差异的主要原因,降雨越多,其值越大。刈割显著提高了土壤呼吸,而刈割对 *GEP* 和 *NEE* 的影响与降水年型有关,在干旱年增加,正常降雨年减小。

参考文献 (References):

- [1] 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸. 生态学杂志, 1998, 17(4): 45-51.
- [2] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 1-6.
- [3] Jensen R, Herbst M, Friborg T. Direct and indirect controls of the interannual variability in atmospheric CO₂ exchange of three contrasting ecosystems in Denmark. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 12-31.
- [4] Law B E, Falge E, Gu L, Baldocchi D D, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens I A, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw U K T, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [5] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, Bonan G B, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luyssaert S, Margolis H, Oleson K W, Rouspard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Woodward F I, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, 2010, 329(5993): 834-838.
- [6] Wan S Q, Norby R J, Ledford J, Weltzin J F. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2411-2424.
- [7] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, McGlade J M, Woodward F I. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the

- present. *Nature*, 1990, 348(6303): 711-714.
- [8] Risch A C, Frank D A. Effects of increased soil water availability on grassland ecosystem carbon dioxide fluxes. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 91-103.
- [9] Fu Y, Zheng Z, Yu G, Hu Z, Sun X, Shi P, Wang Y, Zhao X. Environmental influences on carbon dioxide fluxes over three grassland ecosystems in China. *Biogeosciences*, 2009, 6(12): 2879-2893.
- [10] Yan J H, Zhang Y P, Yu G R, Zhou G Y, Zhang L M, Li K, Tan Z H, Sha L Q. Seasonal and inter-annual variations in net ecosystem exchange of two old-growth forests in southern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182-183: 257-265.
- [11] Xu L K, Baldocchi D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(1/2): 79-96.
- [12] 赵凌平, 谭世图, 白欣, 王占彬. 封育年限对云雾山典型草原植物繁殖与植被更新的影响. *草业学报*, 2017, 26(10): 1-9.
- [13] 王玉红, 马天娥, 魏艳春, 魏孝荣, 邵明安, 程积民, 张兴昌. 黄土高原半干旱草地封育后土壤碳氮矿化特征. *生态学报*, 2017, 37(2): 378-386.
- [14] 程积民, 程杰, 杨晓梅, 刘伟, 陈芙蓉. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征. *生态学报*, 2012, 32(1): 226-237.
- [15] 程积民, 邹厚远. 封育刈割放牧对草地植被的影响. *水土保持研究*, 1998, 5(1): 36-54.
- [16] 仁青吉, 罗燕江, 王海洋, 刘金梅. 青藏高原典型高寒草甸退化草地的恢复——施肥刈割对草地质量的影响. *草业学报*, 2004, 13(2): 43-49.
- [17] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 高云飞, 王清涛. 祁连山中部亚高山草地土壤呼吸及其组分研究. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 653-661.
- [18] Bremer D J, Ham J M, Owensby C E, Knapp A K. Responses of soil respiration to clipping and grazing in a tallgrass prairie. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(6): 1539-1548.
- [19] Wan S Q, Luo Y Q. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: Results of a clipping and shading experiment. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1054.
- [20] Craine J M, Wedin D A, Chapin III F S. Predominance of ecophysiological controls on soil CO₂ flux in a Minnesota grassland. *Plant and Soil*, 1999, 207(1): 77-86.
- [21] Jia X X, Shao M A, Wei X R. Responses of soil respiration to N addition, burning and clipping in temperate semiarid grassland in northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 166-167: 32-40.
- [22] Han Y, Zhang Z, Wang C H, Jiang F H, Xia J Y. Effects of mowing and nitrogen addition on soil respiration in three patches in an oldfield grassland in Inner Mongolia. *Journal of Plant Ecology*, 2012, 5(2): 219-228.
- [23] 罗瑞敏, 郭梁, 程积民. 近 20a 云雾山草地生产力对气候变化的响应. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 77-84.
- [24] 苏纪帅, 赵洁, 井光花, 魏琳, 刘建, 程积民, 张金娥. 半干旱草地长期封育进程中针茅植物根系格局变化特征. *生态学报*, 2017, 37(19): 6571-6580.
- [25] Jasoni R L, Smith S D, Arnone III J A. Net ecosystem CO₂ exchange in Mojave Desert shrublands during the eighth year of exposure to elevated CO₂. *Global Change Biology*, 2005, 11(5): 749-756.
- [26] Chen S P, Lin G H, Huang J H, Jenerette G D. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2450-2461.
- [27] Shao C L, Chen J Q, Li L H. Grazing alters the biophysical regulation of carbon fluxes in a desert steppe. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 025012.
- [28] 周小平, 王效科, 张红星, 庞军柱, 任玉芬, 侯培强, 刘文兆. 黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化. *生态学报*, 2013, 33(23): 7525-7536.
- [29] Peichl M, Carton O, Kiely G. Management and climate effects on carbon dioxide and energy exchanges in a maritime grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 158: 132-146.
- [30] 石培礼, 孙晓敏, 徐玲玲, 张宪洲, 何永涛, 张东秋, 于贵瑞. 西藏高原草原化蒿草草甸生态系统 CO₂净交换及其影响因子. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(S1): 194-203.
- [31] 吴力博, 古松, 赵亮, 徐世晓, 周华坤, 冯超, 徐维新, 李英年, 赵新全, 唐艳鸿. 三江源地区人工草地的生态系统 CO₂净交换、总初级生产力及其影响因子. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 770-780.
- [32] Polley H W, Frank A B, Sanabria J, Phillips R L. Interannual variability in carbon dioxide fluxes and flux-climate relationships on grazed and ungrazed northern mixed-grass prairie. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1620-1632.
- [33] La Pierre J, Smith M D. Functional trait expression of grassland species shift with short- and long-term nutrient additions. *Plant Ecology*, 2015, 216(2): 307-318.
- [34] 马文红, 方精云, 杨元合, 安尼瓦尔·买买提. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7):

- 632-641.
- [35] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, Byers J N. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(1): 65-82.
- [36] Chu X J, Han G X, Xing Q H, Xia J Y, Sun B Y, Li X G, Yu J B, Li D J, Song W M. Changes in plant biomass induced by soil moisture variability drive interannual variation in the net ecosystem CO₂ exchange over a reclaimed coastal wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 138-148.
- [37] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler F J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E S. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *Bioscience*, 2008, 58(9): 811-821.
- [38] 王梅, 付秀琴, 石福孙, 王彦星, 王乾, 卢涛, 吴彦. 刈割对南方草地植物补偿性生长的影响——以渝东北部岐山草场为例. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(3): 474-483.
- [39] 郭明英, 卫智军, 徐丽君, 杨桂霞, 刘红梅, 吴艳玲, 辛晓平. 不同刈割年限天然草地土壤呼吸特性研究. *草地学报*, 2011, 19(1): 51-57.
- [40] Wan S, Luo Y, Wallace L L. Changes in microclimate induced by experimental warming and clipping in tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 754-768.
- [41] Wu Z T, Koch G W, Dijkstra P, Bowker M A, Hungate B A. Responses of ecosystem carbon cycling to climate change treatments along an elevation gradient. *Ecosystems*, 2011, 14(7): 1066-1080.
- [42] Wan S Q, Hui D F, Wallace L, Luo Y Q. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2014.
- [43] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- [44] 张立欣, 杨劼, 高清竹, 苏力德, 干珠扎布, 侯虹. 模拟增温增雨对克氏针茅草原土壤呼吸的影响. *中国农业气象*, 2013, 34(6): 629-635.
- [45] 张素彦, 蒋红志, 王扬, 张艳杰, 鲁顺保, 白永飞. 凋落物去除和添加处理对典型草原生态系统碳通量的影响. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 349-360.
- [46] 初小静, 韩广轩. 气温和降雨量对中国湿地生态系统 CO₂ 交换的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 2978-2990.
- [47] 惠俊爱. 不同光合类型植物光合作用的比较研究. *长江大学学报: 自科版*, 2007, 4(4): 77-80.