

DOI: 10.5846/stxb201503130486

胡毅, 朱新萍, 韩东亮, 贾宏涛, 胡保安, 李典鹏. 围栏封育对天山北坡草甸草原土壤呼吸的影响. 生态学报, 2016, 36(20): - .
Hu Y, Zhu X P, Han D L, Jia H T, Hu B A, Li D P. Effects of fencing on soil respiration rates in the meadow steppes in the northern slope of the Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

围栏封育对天山北坡草甸草原土壤呼吸的影响

胡毅^{1,2}, 朱新萍^{1,2}, 韩东亮^{1,2}, 贾宏涛^{1,2,*}, 胡保安^{1,2}, 李典鹏^{1,2}

¹ 新疆土壤与植物生态过程实验室, 乌鲁木齐 830052

² 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052

摘要: 对新疆天山北坡草甸草原围封 9 年的样地和围栏外的放牧样地进行比较, 采用 LI-8100 土壤呼吸监测系统对草甸草原围栏内外土壤呼吸进行监测, 分析围栏内外土壤呼吸的日变化、季节变化及其与环境因子的关系。结果表明: 围栏内外土壤呼吸速率存在明显的日变化和月变化规律, 均呈单峰曲线, 且在植物生长季峰形比较明显, 围栏内和围栏外土壤呼吸速率最高值出现在 6 月份 17:00, 分别为 $5.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $4.41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 围栏内土壤呼吸速率比围栏外高出 33.1%。最低值出现在 10 月份 8:00, 分别是 $0.26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $0.29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。土壤 CO_2 日排放量与日均气温和地温的变化特征一致, 与日均土壤含水量的变化特征相反, 围栏内的土壤呼吸明显高于围栏外。土壤呼吸速率与气温和 5 cm 地温呈显著正相关, 与其它深度的地温相关性不显著; 与土壤湿度相关性不显著。

关键词: 围栏封育; 土壤呼吸; 地温; 土壤含水量; 草甸草原

Effects of fencing on soil respiration rates in the meadow steppes in the northern slope of the Tianshan Mountains

HU Yi^{1,2}, ZHU Xinping^{1,2}, HAN Dongliang^{1,2}, JIA Hongtao^{1,2,*}, HU Bao'an^{1,2}, LI Dianpeng^{1,2}

¹ Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China

² College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Abstract: Soil respiration is an important indicator in evaluating soil surface carbon dioxide (CO_2) flux, and carbon cycling in grassland ecosystems is strongly affected by grassland management and implementation. Fencing and grazing are two important grassland management tools in the meadow steppe of the Tianshan Mountains; however, there is limited knowledge of how fencing may influence soil respiration in the arid and semi-arid areas of meadow steppes. In our study, we compared short-term (9-year fencing) fenced meadow steppes with grazed meadow steppes along the northern slopes of arid and semi-arid areas of the Tianshan Mountains of China. We evaluated daily and seasonal soil respiration dynamics and the correlation between soil respiration rate and environmental factors in both fenced and grazed meadow steppes using a Li-8100 automated soil CO_2 flux system (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA). Significant variations of daily and seasonal soil respiration rate were found as a one-peaked curve at the evaluated fenced and grazing meadow steppe in Tianshan Mountains, and the single peak in the growing season was especially obvious. In June, daily soil respiration rates peaked at 17:00 h for both areas, but soil respiration rates were 33.1% higher in fenced ($5.87 \mu\text{mol/m}^2 \text{s}^{-1}$) than grazed ($4.41 \mu\text{mol/m}^2 \text{s}^{-1}$) meadow steppes. In October, daily soil respiration rates were lowest at 08:00 h for both fenced ($0.26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and grazed ($0.29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) meadow steppes. Annual CO_2 flux is highest in summer, and the contribution of

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050405); 国家自然科学基金 (31560171); 新疆维吾尔自治区研究生教育创新计划 (XJGRI2014084)

收稿日期: 2015-03-13; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongtaojia@126.com

CO₂ flux in June and July to the total annual CO₂ flux was highest during our sampling period. Furthermore, CO₂ flux was 37% higher at fenced than at grazing sites, suggesting that fencing had a more positive effect on CO₂ flux than grazing in arid and semiarid areas of the meadow steppes. Our results are mainly due to the decrease in belowground biomass and root secretion, which reduces root and microbe respiration. The dynamics of soil CO₂ flux were consistent with fluctuations in average daily air and soil temperature, and contrasted with changes in average daily soil moisture content. Our correlation analysis showed that surface soil (0—5 cm) and near surface air temperature are significantly correlated with soil respiration ($P < 0.05$), but there was no significant correlation between soil respiration and soil moisture. Soil respiration and soil temperature were more correlated at surface soil (0—5 cm) than subsoil (> 5 cm, measured using the angle stem earth thermometer) and this relationship was more significant in fenced than grazed sites. Our results indicate that surface soil (0—5 cm) and near surface air temperature is the main factor influencing the dynamics of soil respiration rates in mountain meadow steppes; and surface soil temperature is a better indicator of soil respiration than subsoil temperature in meadow steppe areas.

Key Words: fencing; soil respiration; soil temperature; soil moisture content; meadow steppes; CO₂ flux; grassland management

土壤呼吸 (Soil respiration) 是指土壤释放二氧化碳的过程, 即 CO₂ 被陆地上植物同化后又返回大气的重要途径, 是大气 CO₂ 浓度升高的重要因素之一。据估计, 土壤每年向大气中释放 64—72 Pg C, 占到陆地和海洋年碳排放总量的 20—38%^[1], 构成了陆地生态系统 CO₂ 排放的最大通量^[2-3]。因此, 土壤呼吸不仅影响大气 CO₂ 浓度, 同时也是生态系统碳平衡的重要决定因素^[4]。草原作为陆地的重要组成部分, 面积约 44.5×10^8 hm²^[5], 草地生态系统在全球碳循环中起着十分巨大的作用^[6], 这是由于草地约占地球表面土地总面积的三分之一; 草地是目前人类活动影响最严重的区域^[7]。新疆草地资源丰富, 草地面积为 57.26×10^7 hm², 草地面积位于全国草地面积的第三位^[8]。在新疆的山地草甸草原面积 26.57×10^5 hm², 仅占新疆区草地面积的 5.53%^[9]。草甸草原有很高的产草量, 因此是新疆重要的草场之一^[10]。

放牧作为目前最主要的草地利用方式, 对草原生物量、土壤、根系、水、热等因子均存在着不同程度的影响, 但是目前由于过度放牧等人为原因使得草地出现了退化的趋势, 而近年来围栏封育成为草地管理模式得到了较大的推广。因此, 要准确的评估草地生态系统碳收支, 必须对草地生态系统碳过程进行系统研究^[11]。目前关于草地碳循环的研究成为热点, 研究土壤呼吸及其影响因子, 对于理解全球碳循环有重要的意义, 但大多数主要集在荒漠草原、典型草原、高寒草原等, 虽然也有对草甸草原的研究, 但是对山地草甸草原的研究尚属空白。本研究以天山北坡的山地草甸草原带为研究对象, 通过对围封 9 年的长期观测样地与自然放牧区的季节动态监测与调查, 获得围栏内外的土壤呼吸速率, 土壤温度、土壤湿度的 4—10 月动态数据, 在数据分析的基础上, 明确了草甸草原围栏封育后土壤呼吸的日动态及季节动态, 并对其与环境因素之间的关系进行探讨, 研究结果对于进一步认识干旱区域草地生态系统碳循环过程和影响机制具有一定的参考作用, 将对新疆草地土壤碳平衡的准确评估提供数据参考, 同时也可作为山地草地生态系统土壤碳排放机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北坡典型温性草甸草原, 行政上隶属新疆乌鲁木齐县甘沟乡 (E 87.2145°, N 43.54133°), 海拔 1742 m, 属于大陆性的干旱气候。该区坡向为半阴坡, 坡度 28—33°, 地势起伏较大, 坡呈南北走向, 土壤类型为栗钙土。该研究区植被以针茅 (*Stipa capillata*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、火绒草 (*Leontopodium*)、糙苏 (*Phlomis umbrosa*) 为优势种, 以羊茅 (*Festuca ovina*)、委陵菜 (*Potentilla aiscolor Bunge*) 为伴生种等, 是典型山地草甸草原。自 2005 年开始围栏处理, 围栏封育样地约为 400 m², 围栏内为禁牧, 围栏外为自由放牧, 围封

前围栏内与围栏外草地本底状况一致,利用强度为中度。

1.2 方案设计

试验于2013年4—10月进行,以围封9年(终年禁止放牧)样地和围栏外自由放牧样地为研究对象,在围栏内外分别随机设置5个长期固定 Li-8100 底座,每月中旬监测一次完整的土壤呼吸速率日变化特征,监测频度为当天 11:00 至次日 11:00 结束,每三小时监测 1 次,同步监测环境因素,包括土壤 0—10 cm 含水量,近地面气温,5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm 土壤温度等。

1.3 试验方法

土壤呼吸采用开路式土壤碳通量监测系统,仪器型号为 Li-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA),为了减少对土壤的扰动,试验开始前一天,与4月初在围栏内外各随机安置5个PVC管基座(高100 mm,直径200 mm),50 mm 插入土壤,围栏内外 PVC 管基座内环高度保持一致,均为 50 mm,去除 PVC 管内的植物,底座长期固定;4—10 月份,选取每个月中旬的晴朗天气进行监测,连续测量 24 小时,每 3 小时测量一次,同步测量每个时间段的近地面气温、土壤含水量和土壤温度;土壤含水量采用野外采样-室内烘干法进行,5 cm 土壤温度采用 Li-8100 自带的温度探头,10 cm、15 cm、20 cm、25 cm 地温采用地温计进行观测;地温计安置在 PVC 管附近,土壤湿度采样在距离 PVC 管基座约 50—100 cm 处进行,采样深度 0—10 cm。

1.4 数据处理

对所得数据采用 Excel 2003、SPSS18.0 进行数据处理和分析。采用单因素方差分析(ANOVA)检验围栏内外土壤呼吸速率的显著性。采用双变量相关分析中的 Pearson 相关分析,分析土壤呼吸速率与土壤温度、土壤湿度的相关性。以每月中旬测定土壤呼吸速率的日动态变化,通过加权累加计算求得当日的土壤呼吸日排放量。土壤日均地温是用各个时间段的地温累加平均求得,日均土壤湿度是用各个时间段的土壤湿度累加平均求得。

2 结果与分析

2.1 围栏内外土壤呼吸的日动态及月动态

图 1 所示为 2013 年 4—10 月围栏内外土壤呼吸速率的日动态(2:00—23:00),从图 1 可以看出,围栏内外各月的土壤呼吸速率日变化趋势基本相同,都呈先升后降的单峰曲线,放牧并没有改变草甸草原土壤呼吸的日变化特征;在植物生长季 5—8 月峰形比较明显,4、9、10 月份无明显峰形,变化趋于平缓;高峰值一般出现在午后 14:00—17:00,最低值一般出现在夜间 23:00 至次日凌晨 8:00;围栏内和围栏外 6 月份土壤呼吸速率达到全年的最高值,在午后 17:00 时,分别为 $5.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $4.41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,高出围栏外 33.1%。10 月份土壤呼吸速率最小,出现在早晨 8:00,分别是 $0.26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $0.29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

2.2 土壤呼吸速率对围栏封育的响应

运用单因素方差分析对围栏内外的土壤呼吸速率的日动态进行分析得出,围栏内的土壤呼吸速率高于围栏外,除 10 月份差异性不显著外,其余观测月份均呈现极显著差异;植物生长季围栏内外土壤呼吸速率均呈显著性差异(4—8 月)(表 1, $P < 0.01$);6、7、8 月份围栏内外各个时间段的土壤呼吸速率均处于极显著水平。9 月份 5:00、8:00 两个时间段差异不显著($P > 0.05$),其他时间段差异显著($P < 0.05$);10 月份除了 14:00 差异显著外,其余时间段围栏内外土壤呼吸差异不显著($P > 0.05$);土壤微生物活动是土壤呼吸作用的主要来源,10 月份温度比较低,微生物活动微弱,造成 10 月份围栏内外土壤呼吸的差异性不显著。从全年来看,围封后草甸草原土壤呼吸速率显著高于自然放牧对照。

2.3 土壤 CO₂各月日排放量和温度及土壤含水量的季节动态

由图 2、3 可以得出,从 4—10 月份来看,围栏内外的土壤碳排放量的月动态均呈现单峰曲线,6、7 月份是植物的生长旺盛期,土壤呼吸作用明显大于植物的生长前期和生长后期,对总的土壤碳排放贡献最大,碳排放量 约占总量的 49.9% 和 51.6%。从围栏内外来看,4—8 月份围栏内的碳排放极显著高于围栏外($P < 0.01$),

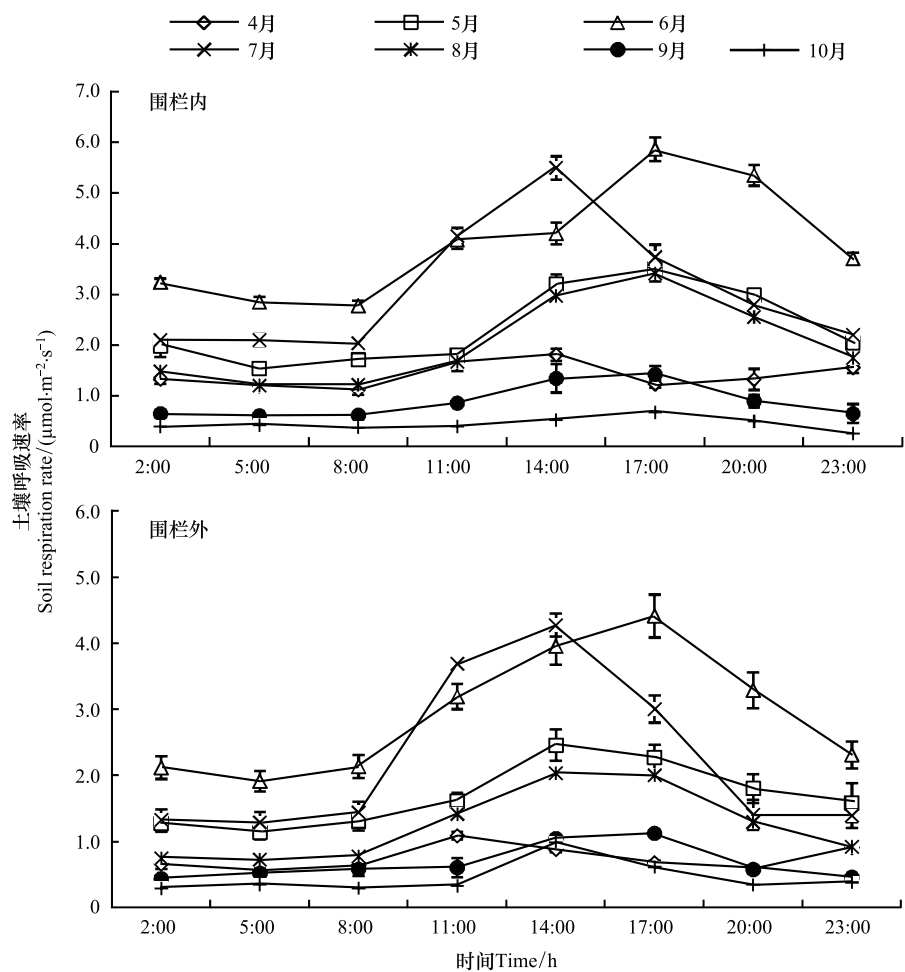


图1 围栏内(a)、围栏外(b)土壤呼吸速率日动态及月动态

Fig.1 Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration rate at the fenced (a) and grazing plots (b)

表1 围栏内外土壤呼吸速率日动态的差异性分析

Table 1 Analysis of diurnal dynamics of the soil respiration rate inside and outside fencing

日期 Date	样地 Plots	土壤呼吸速率 Soil respiration rate/($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)							
		2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
4-14	围栏内	1.33±0.09A	1.2±0.1A	1.12±0.1A	1.67±0.18a	1.81±0.12A	1.24±0.08A	1.33±0.21A	1.56±0.1A
	围栏外	0.66±0.07B	0.55±0.07B	0.64±0.1B	1.09±0.06b	0.89±0.04B	0.68±0.04B	0.58±0.04B	0.91±0.07B
5-16	围栏内	1.99±0.22a	1.54±0.09A	1.71±0.08a	1.81±0.05a	3.21±0.19a	3.51±0.25A	2.99±0.12A	2.04±0.1a
	围栏外	1.28±0.12b	1.14±0.11B	1.31±0.14b	1.62±0.12a	2.46±0.24b	2.28±0.19B	1.81±0.22B	1.59±0.29a
6-22	围栏内	3.24±0.08A	2.86±0.1A	2.78±0.1A	4.08±0.18A	4.21±0.21a	5.87±0.23A	5.36±0.21A	3.71±0.12A
	围栏外	2.12±0.17B	1.92±0.16B	2.14±0.18B	3.2±0.19B	3.96±0.28a	4.41±0.32B	3.29±0.27B	2.32±0.2B
7-14	围栏内	2.11±0.07A	2.11±0.12A	2.04±0.04A	4.16±0.16A	5.5±0.23A	3.74±0.25A	2.8±0.14A	2.2±0.07A
	围栏外	1.33±0.16B	1.3±0.15B	1.44±0.16B	3.69±0.08B	4.28±0.17B	3.01±0.2B	1.41±0.23B	1.39±0.19B
8-19	围栏内	1.49±0.06A	1.2±0.06A	1.22±0.03A	1.67±0.06A	2.97±0.28A	3.42±0.16A	2.56±0.12A	1.75±0.19A
	围栏外	0.75±0.06B	0.73±0.07B	0.78±0.06B	1.42±0.06B	2.03±0.09B	2.00±0.09B	1.3±0.1B	0.92±0.08B
9-24	围栏内	0.65±0.04A	0.6±0.06a	0.62±0.02a	0.86±0.06A	1.35±0.16A	1.42±0.09a	0.9±0.25a	0.65±0.04A
	围栏外	0.44±0.04B	0.52±0.07a	0.59±0.11a	0.61±0.14B	1.05±0.03B	1.13±0.04b	0.58±0.05b	0.47±0.03B
10-16	围栏内	0.39±0.04a	0.43±0.03a	0.38±0.03a	0.4±0.05a	0.62±0.09a	0.67±0.04a	0.5±0.06a	0.26±0.09a
	围栏外	0.29±0.03a	0.35±0.05a	0.3±0.05a	0.33±0.04a	0.95±0.04b	0.62±0.01a	0.35±0.05a	0.39±0.04a

大写表示在 $P<0.01$ 水平下显著,小写代表在 $P<0.05$ 水平下显著

10 月份差异性不明显($P>0.05$)。最大值出现在 6 月,围栏内外分别为 $15.26 \text{ gCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, $11.09 \text{ gCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 围栏后碳排放量增加了 37.6%, 最小值出现在 10 月, 分别为 $1.68 \text{ gCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, $1.72 \text{ gCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 。土壤呼吸的日排放量的最大值与最小值相差约 6—9 倍。土壤各月的日排放量与各月平均地温和气温变化趋势基本一致, 与土壤含水量趋势相反, 表明土壤 CO_2 排放量在月动态上的变化与温度呈正相关, 与含水量呈负相关。

2.4 草甸草原土壤呼吸对水热因子的响应

2.4.1 土壤呼吸速率与土壤含水量的关系

从图 4 可以得出, 围栏内外土壤呼吸速率日动态与土壤含水量的日动态的相关性均不显著, 围栏内 $R^2 = 0.0216$, $P = 0.262$, 围栏外 $R^2 = 0.0428$, $P = 0.113$ 。总的来说, 最优的水分状况通常是接近最大田间持水力, 当土壤处于过干或过湿状态时, 土壤呼吸会受到抑制。本研究区属于大陆性干旱气候, 土壤湿度较低, 有可能成为限制土壤呼吸的关键因子。

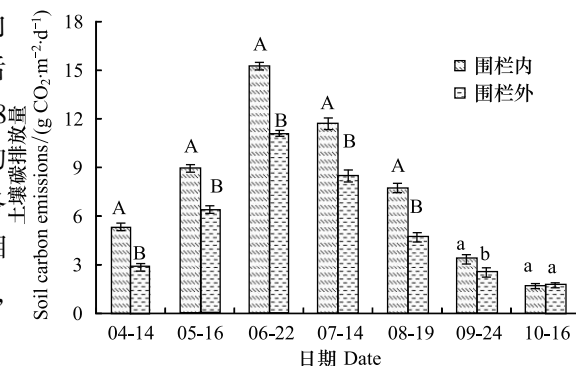


图 2 围栏内外土壤 CO_2 排放量的月动态

Fig.2 The seasonal dynamics of soil CO_2 emissions inside and outside fencing

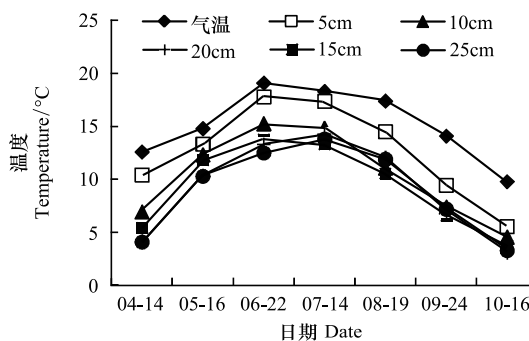
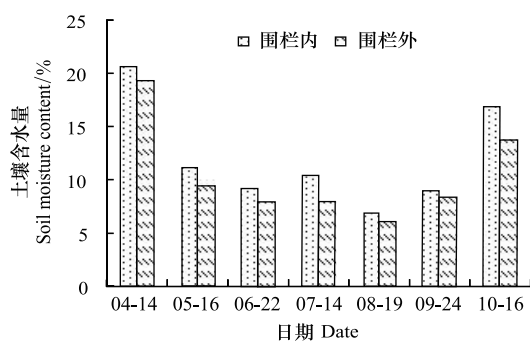


图 3 各月平均土壤含水量和土壤温度

Fig.3 The daily average moisture content and daily average temperature in each month

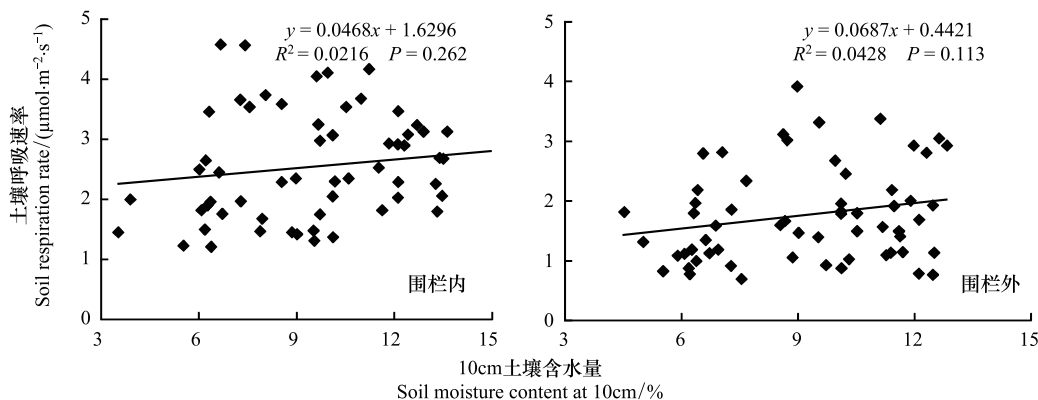


图 4 土壤呼吸速率与土壤含水量的相关性

Fig.4 The correlations between soil respiration rate and soil moisture content at 10 cm

2.4.2 土壤呼吸速率与温度的关系

运用 SPSS 统计软件中双变量相关分析中的 Pearson 相关分析, 对围栏内外的土壤呼吸速率的日动态与近地面气温及不同深度的土温进行了相关性比较, 结果见表 2。由表 2 可以看出, 围栏内土壤呼吸速率与温

度的相关性大小依次 5 cm>气温>10 cm>15 cm>20 cm>25 cm, 围栏外大小依次为气温>5 cm>10 cm>15 cm>20 cm>25 cm。

表 2 围栏内外不同日期土壤呼吸速率与温度的相关性

Table 2 Correlation coefficients between soil respiration rate and temperature in different months

样地 Plots	日期 Date	气温	土温 Soil temperature/°C				
		Air temperature/°C	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm
围栏内 Inside the fence	4-14	0.447 *	0.436 **	0.288	0.048	-0.025	-0.206
	5-16	0.799 **	0.742 **	0.452 **	0.286	0.018	0.005
	6-22	0.577 *	0.829 **	0.616 **	0.398 *	0.187	-0.027
	7-14	0.516 **	0.788 **	0.408 *	0.374	0.030	-0.337
	8-19	0.858 **	0.878 **	0.605 **	0.512 *	0.412 *	0.295
	9-24	0.829 **	0.811 **	0.552 **	0.364	0.275	-0.556 **
	10-16	0.461 *	0.489 **	0.049	-0.100	-0.122	-0.338
	平均 Mean	0.641	0.710	0.424	0.269	0.111	-0.166
围栏外 Outside the fence	4-14	0.404 *	0.344 *	0.143	0.075	-0.096	-0.219
	5-16	0.685 **	0.525 **	0.372 *	0.109	0.048	-0.281
	6-22	0.613 **	0.735 **	0.594 **	0.260	0.195	0.094
	7-14	0.595 **	0.729 **	0.315	0.234	-0.109	-0.011
	8-19	0.907 **	0.879 **	0.569 **	0.330	0.071	-0.057
	9-24	0.835 **	0.792 **	0.356	0.064	-0.063	-0.300
	10-16	0.841 **	0.671 **	0.253	-0.038	-0.107	-0.267
	平均 Mean	0.697	0.668	0.372	0.148	-0.009	-0.149

注: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

总的来说,围栏内外相同之处是土壤呼吸速率与气温和 5 cm 地温相关性比较好,相关系数平均值为:围栏内外土壤呼吸与气温相关性分别是 0.641 和 0.697,土壤呼吸速率与 5 cm 的相关性围栏内外分别是 0.710 和 0.668。围栏内外 5 cm 地温除了围栏外的 4 月份表现出显著水平外,其它各月份均达到极显著水平;与其它层次的温度和气温相比,5 cm 地温能更好的反映土壤呼吸的变化情况。随着土壤深度的增加相关性不断降低,并且在 25 cm 深度土壤呼吸与地温基本呈现出负相关。

围栏内与围栏外相比,除了气温的相关性围栏外稍高些,而不同深度的地温与土壤呼吸的相关性都要高于围栏外。一昼夜内,土层温度变化大,土壤含水量变化小或者说基本稳定,所以土壤呼吸日动态主要受土层温度的控制。由图 4 的结果土壤呼吸速率与土壤含水量之间的相关性不显著($P > 0.05$),由此,我们得出了在天山北坡草甸草原生态系统中,温度是决定土壤呼吸的主导因子。

3 讨论

碳以 CO_2 的形式从土壤向大气圈的流动是土壤呼吸作用的结果,作为一个复杂的生态学过程,土壤呼吸在受到植被、微生物等生物影响的同时,也受到温度、湿度、等多种环境因素的影响,它是反映生态系统对气候变化和环境胁迫响应的一个重要指标。土壤温度和水分是影响土壤呼吸的主要环境因子。温度和水分主要通过影响土壤中微生物的活动、根系的生长与呼吸以及有机质的分解速率等来对土壤呼吸强度产生影响。

3.1 围栏封育对土壤呼吸的影响

放牧是目前我国草地最主要的利用方式,对草地土壤呼吸作用的影响主要在于对土壤微生物数量、植物根系生长和土壤孔隙度、含水量等方面的影响,对土壤有机质含量也有一定影响^[12]。而近些年围栏封育在我国作为一种草地管理模式得到了较大的推广,至于围封对土壤呼吸所起的作用如何,不同的研究者在特定的条件下所得到的结果又较大的差异。

有研究表明,草场在恢复过程中土壤呼吸作用会增强,过度放牧减少土壤年呼吸总量的 33%^[13],对新疆

巴音布鲁克退化草地围封的生态效应进行分析表明,围栏内碳通量均高于围栏外,CO₂排放通量均有昼高夜低单峰曲线的特点^[14]。阿木日吉日嘎拉等研究了不同放牧强度对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响表明,土壤呼吸速率强度随着放牧强度的增加而减弱^[12]。杨阳等^[15]对不同草原类型土壤呼吸与放牧强度的关系研究得出了,放牧降低了土壤呼吸的作用。本研究与以上结论一致,围栏后土壤呼吸明显高于自然放牧区(表1)。究其原因,围栏内不受动物的啃食、践踏等人为干扰,植被长势茂盛,植物根系呼吸占土壤总呼吸比重较大,而放牧在植物生长季,牲畜啃食部分的活体生物量,使地下生物量降低^[16]。此外,根系的分泌物可以促进微生物的呼吸^[17]。而放牧样地在降低地下生物量的同时,也减少了根系分泌物的产生,从而使围栏外的土壤呼吸小于围栏外。但也有研究表明,放牧可促进草地土壤呼吸作用,释放更多的CO₂^[13,18]。这可能和其研究地点的地理位置,植被群落类型,气候,管理措施等之间的差异有关,仍需要进一步研究。

3.2 土壤呼吸与环境因子的关系

温度作为生态系统土壤呼吸的一个控制因素,是预测土壤呼吸对全球变化的重要参数之一^[19],一天当中,土壤呼吸速率随土壤温度的增加而增加,在12:00—15:00出现峰值,最小值出现在2:00—4:00^[20]。与本研究一致,围栏内外的土壤呼吸均呈单峰曲线,一昼夜内,在14:00—17:00达到峰值,最低值出现在夜间23:00至次日凌晨8:00,众多研究表明,土壤温度与土壤呼吸速率具有显著相关性,但由于研究区域的差异,不同层次的土温对土壤呼吸速率会产生不同的影响。贾丙瑞等^[21]的研究表明,不同层次土壤温度与土壤呼吸作用日、季动态的关系明显表现出浅层(0—10 cm)的相关性明显大于深层(10 cm以上)。对新疆典型性亚高山草甸25年围栏内外土壤CO₂日排放进行连续观测研究表明,浅层土壤土壤温度(包括地表地下5 cm、10 cm土壤温度, $P<0.01$)与土CO₂排放通量日变化呈显著正相关性,但15 cm、20 cm和25 cm地温与其无相关性^[22]。本研究认为,不论是围栏内还是围栏外,不同层次的土壤温度与土壤呼吸的日、月动态的关系均明显表现为表层(5 cm)的相关性大于深层(10 cm以上),与以上结论大致相同。究其原因,一是表层土壤中的微生物量要大于深层土壤并且活动性强,对总的土壤呼吸贡献最大^[23]。二是表层作为土壤微生物生长、活动的重要能量来源,土壤有机质在草原地表层含量最高,随着土壤深度的增加而逐渐降低^[24]。三是表层土壤温度的变幅大,深层土壤温度变幅小,表层土壤温度对微生物活性的影响比深层土壤大^[25]。于此相反,马骏^[21]对内蒙古农牧交错区土壤呼吸与温度敏感的变化研究表明,10—15 cm深度的土壤温度对土壤呼吸速率的解释能力高于表层0—5、5—10 cm的土壤温度。分析其原因,由于不同的研究地点,不同的植被类型都会对二者的关系产生影响^[26]。从而使土壤呼吸速率不仅仅受土壤温度的控制。

土壤含水量是影响土壤呼吸速率的另一个重要因素,其对土壤呼吸的影响机制包括水分对土壤空隙中CO₂替代、对CO₂扩散的阻滞、对微生物活动的刺激和对微生物生物量的影响等。大量研究表明,土壤含水量与土壤呼吸速率存在很好的线性关系^[21-22,26];也存在与其相悖的结果。龚斌等^[27]研究了土壤呼吸与土壤湿度的关系,结果表明土壤呼吸速率与土壤湿度相关性不显著,并且给出了土壤湿度为25%是影响土壤呼吸速率的分界点。刘霞等^[28]对岛状林沼泽的研究,结果表明土壤呼吸与湿度的相关性较差,白桦林与落叶松两种不同的林地相关性分别是0.242和0.373。其结果与本研究区域的土壤含水量与土壤呼吸速率无显著相关性($P>0.05$)一致。究其原因,本研究区属于大陆性气候,降雨量偏少,且每次数据的监测都是选择晴朗的天气,一天内土壤含水量变化较小,可能掩盖了土壤呼吸随土壤含水量变化的真实规律,故而土壤呼吸速率与土壤含水量之间没有显著的相关关系。

4 结论

(1)山地草甸草原,不论围栏内还是围栏外,土壤呼吸都表现为明显的日变化和季节变化规律,均呈单峰曲线,放牧并没有改变土壤呼吸速率的变化规律,5—8月峰形比较明显,4、9、10月份无明显峰形,碳排放大小夏季明显高于其他月份,尤其是6、7月份土壤呼吸对总的碳排放量贡献最大,围栏内比围栏外碳排放量增加了37%。总的来说,围栏内碳排放显著高于围栏外。

(2) 温度与湿度是影响土壤呼吸的两个重要因子,但温度起主导作用。在山地草甸草原,土壤呼吸与土壤含水量的相关性不显著;土壤呼吸与地温有着显著的正相关关系,温度是决定该山地草甸草原土壤呼吸的主导因子。围栏内外浅层土壤(0—5 cm)相关性要高于其它深度的土壤,并且在各个层次的土壤,围栏内土壤呼吸与温度的相关性要高于围栏外,5 cm 的地温能更好的反映土壤呼吸的变化情况。

参考文献 (References):

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44(2): 81-99.
- [2] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 3-27.
- [3] Jassal R S, Black T A, Cai T, Morgenstern K, Li Z, Gaumont-Guay D, Nesic Z. Components of ecosystem respiration and an estimate of net primary productivity of an intermediate-aged Douglas-fir stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 144(1/2): 44-57.
- [4] Phillips C L, Nickerson N, Risk D, Bond B J. Interpreting diel hysteresis between soil respiration and temperature. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 515-527.
- [5] Aitay G L, Ketner P, Duvigneaud P. Terrestrial primary production and phytomass // Bolin B, Degens E T, Kempe S, Ketner P, eds. *The Global Carbon Cycle SCOPE 13*. Chichester: John Wiley & Sons, 1979: 129-181.
- [6] 李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应 I. 碳循环的分室模型、碳输入与贮量. *植物学通报*, 1998, 15(2): 14-22.
- [7] Smith M S. *Global Change Impacts on Pastures and Rangelands (Implementation Plan)*. Canberra: GCTE Core Project Office, 1995.
- [8] 许鹏. 新疆草地资源及其利用. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993: 21-23.
- [9] 许鹏. 新疆荒漠区草地与水盐植物系统及优化生态模式. 北京: 科学出版社, 1998: 9-11.
- [10] 叶茂, 徐海量, 王小平, 李祥心. 新疆草地生态系统服务功能与价值初步评价. *草业学报*, 2006, 15(5): 122-128.
- [11] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 王玉辉. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子. *环境科学*, 2005, 26(6): 1-7.
- [12] 阿木日吉日嘎拉, 红梅, 韩国栋, 高福光, 赵巴音那木拉, 刘超川. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. *土壤通报*, 2013, 44(2): 321-327.
- [13] Davidson E A, Verchot L V, Cattânio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [14] 贾宏涛. 新疆退化草地围封的生态效应分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007.
- [15] 杨阳, 韩国栋, 李元恒, 陈志芳, 王成杰. 内蒙古不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应. *草业学报*, 2012, 21(6): 8-14.
- [16] 王树起, 韩晓增, 乔云发. 根系分泌物的化感作用及其对土壤微生物的影响. *土壤通报*, 2007, 38(6): 1219-1226.
- [17] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3496-3504.
- [18] Tongway D J, Ludwig J A. Rehabilitation of semiarid landscapes in Australia. I. Restoring productive soil patches. *Restoration Ecology*, 1996, 4(4): 388-397.
- [19] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems-recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 141-153.
- [20] 马骏, 唐海萍. 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 167-175.
- [21] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 王玉辉. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1611-1615.
- [22] 李赞, 贾宏涛, 方光新, 蒋平安, 胡玉昆, 董自红, 曹叶飞. 围栏封育对新疆亚高山草甸土壤夏季 CO₂ 日排放的影响. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 892-896.
- [23] 郭明英, 朝克图, 尤金成, 徐丽君, 王丽娟, 贾淑杰, 辛晓平. 不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性. *草地学报*, 2012, 20(1): 42-48.
- [24] 孙宗玖, 朱进忠, 张鲜花, 郑伟, 靳瑰丽, 古伟容. 放牧强度对昭苏草甸草原土壤有机质及速效养分的影响. *草业科学*, 2013, 30(7): 987-993.
- [25] 栾军伟, 刘世荣. 土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素. *生态学报*, 2012, 32(15): 4902-4913.
- [26] 齐玉春, 董云社, 刘立新, 刘杏认, 彭琴, 肖胜生, 何亚婷. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3): 341-351.
- [27] 龚斌, 王凤玉, 张继平, 沃笑, 刘伟玲, 齐月. 中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1275-1281.
- [28] 刘霞, 胡海清, 李为海, 孙程坤, 黄超, 赵希宽, 孙龙. 寒温带岛状林沼泽土壤呼吸速率和季节变化. *生态学报*, 2014, 34(24): 7356-7364.