

祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量的时空变化及其影响分析

常宗强, 冯起, 司建华, 苏永红, 席海洋, 郭瑞

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区流域水文及应用生态实验室, 兰州 730000)

摘要: 采用 Li-6400 便携式光合作用测量系统连接 Li-6400-09 土壤呼吸室, 在 2004 年生长季节对祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量沿海拔梯度进行了野外定位试验, 统计分析了水热因子及根系生物量对高山草甸土壤 CO₂ 通量特征的可能影响. 结果表明, 土壤 CO₂ 通量存在明显的空间变化规律, 沿海拔梯度土壤 CO₂ 通量随着海拔梯度的增加而逐渐减小, 其变异系数逐渐增加; 就日变化而言, 土壤 CO₂ 通量晚间维持在较低水平, 02:00 ~ 06:00 最低, 在 07:00 ~ 08:30 开始升高, 11:00 ~ 16:00 达到峰值, 16:00 ~ 18:30 开始下降, 整个过程呈单峰曲线. 土壤 CO₂ 通量的日平均值介于 $(0.56 \pm 0.32) \sim (2.53 \pm 0.76) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 从季节变化来看, 土壤 CO₂ 通量均以夏秋季较高, 春冬季排放量较低, 7 ~ 8 月份达到最大值 $[4.736 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$, 6 月与 9 月份次之, 5 月与 10 月份基本一致, 整个生长过程总的变化趋势呈单峰曲线形式. 高山草甸土壤 CO₂ 通量在植物生长季与 10 cm 土壤温度、土壤含水量、根系生物量都存在不同程度的正相关关系, 表明高山草甸土壤 CO₂ 通量的空间变异主要受温度、水分和植物根系的综合影响.

关键词: 时空变化; 温度; 湿度; 根系生物量; 高山草甸; 祁连山

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)10-2389-07

Analysis of the Spatial and Temporal Changes in Soil CO₂ Efflux and Its Related Factors from Alpine Meadow in Qilian Mountains

CHANG Zong-qiang, FENG Qi, SI Jian-hua, SU Yong-hong, XI Hai-yang, GUO Rui

(Laboratory of Watershed Hydrology and Ecology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Continuous field experiment was carried out on alpine meadow along different elevation gradient in Qilian Mountains during the growing season of 2004 using a soil respiration chamber (Li-6400-09) connected to a portable photosynthesis system (Li-6400). The possible effect of water-heat factors and root parameter on characteristics of alpine meadow soil respiration was statistically analyzed. The results indicate that soil CO₂ efflux has apparent spatial variation laws. Spatial variation patterns of soil respiration from different alpine meadow along elevation gradient are gradually decreased and its coefficient of variation increases gently. The curves of day change of soil CO₂ efflux have a simple peak value, and it is low at night, with lowest at 02:00 ~ 06:00, and starts to rise rapidly during 07:00 ~ 08:30, and then descends during 16:00 ~ 18:30. The peak CO₂ efflux appears during 11:00 ~ 16:00. The diurnal average of soil CO₂ efflux is between $(0.56 \pm 0.32) \sim (2.53 \pm 0.76) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. As for seasonal variation, soil CO₂ fluxes of various are relatively high in summer and autumn but relatively low in spring and winter. The maximum of average soil CO₂ efflux occurs in July and August $[4.736 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$, and the second is in June and September, and the third is in May and October. Soil CO₂ efflux of alpine meadow during growth season is positively correlated with soil temperature, root biomass and soil water content at depths of 10 cm to different degrees. These results indicate that the temperature, soil moisture and root biomass have great effects on the spatial variation of soil CO₂ efflux in the area.

Key words: spatial and temporal variation; temperature; moisture; root biomass; alpine meadow; Qilian Mountains

土壤 CO₂ 通量既是土壤中异养微生物和植物根系进行生命活动的标志^[1], 也是碳循环的重要组成部分^[2]. 估测土壤中 CO₂ 的释放量, 确定其与环境因子和人类活动的关系, 不仅对于估价生物学过程在生态系统碳收支中的作用非常关键^[1], 而且对评测陆地生态系统在全球碳循环中的功能和地位也有着极其重要的意义. 土壤 CO₂ 通量是土壤中最易变化的因素, 所以要对其量化存在着相当大的困

难^[3,4]. 如果能够确定特定生态系统土壤 CO₂ 通量的时空变异特征及其与影响因子之间的关系, 那么, 就可以通过这些因子来估测土壤中 CO₂ 的排放量^[5~8].

收稿日期: 2006-12-19; 修订日期: 2007-02-09

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目 (CXTD-Z2005-2); 科技部“重大基础研究前期研究专项” (2005CCA05200); 国家自然科学基金项目 (40501012)

作者简介: 常宗强 (1974 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为干旱区生态水文及碳循环理论, E-mail: changzq@lzb.ac.cn

到目前为止,对土壤 CO₂ 通量的时间动态及其与影响因子之间的关系有了大量的研究^[9~16].然而,在区域尺度上,以不同海拔高度植物群落结构变化为切入点,探索不同环境条件下土壤呼吸强度的变化与环境要素的关系方面的研究鲜见报道.本研究以祁连山高山草甸为对象,基于不同海拔高山草甸土壤 CO₂ 通量及其环境要素的对比观测,探讨不同环境条件下生长季高山草甸土壤 CO₂ 通量的强度变化和过程差异,获得土壤 CO₂ 通量的空间变异与海拔高度、水分、温度以及根系生物量等环境要素的关系,对进一步认识陆地生态系统土壤与大气碳交换的机制和源汇变化具有一定的科学意义.

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于甘肃省肃南县西水林场的排露沟流域.流域面积 2.95 km²,其中草地面积约占该流域面积的 55%,林地面积约 40%.气候类型属于高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候,年均气温 0.5℃,年均降水 435 mm,年可能蒸发量 1 051 mm^[17].

表 1 高山草甸主要植物种组成及土壤理化性状

Table 1 Soil physics-chemical properties and vegetation composition mostly of alpine meadow at different altitude level

海拔范围 /m	物种组成	土壤理化性状		
		容重 /g·cm ⁻³	孔隙度 /%	有机质 /g·kg ⁻¹
2 500 ~ 2 600	马蔺(<i>Iris ensata</i>), 醉马草(<i>Achnatherum inebrians</i>), 大针茅(<i>Stipa grandis</i>), 冰草(<i>Agropyron cristatum</i> L.), 萎陵菜(<i>Potentilla</i>)	0.52	53.2	71.06
2 600 ~ 2 700	萎陵菜(<i>Potentilla</i>), 醉马草(<i>Achnatherum inebrians</i>), 苔草(<i>Carex</i>), 白黎(<i>Chenopodium album</i> L.), 黄花棘豆(<i>Oxytropis ochrocephala</i>), 大针茅(<i>Stipa grandis</i>)	0.58	52.8	74.71
2 700 ~ 2 800	苔草(<i>Carex</i>), 醉马草(<i>Achnatherum inebrians</i>), 珠芽蓼(<i>Polygonum viviparum</i>), 黄花棘豆(<i>Oxytropis ochrocephala</i>), 芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)	0.62	51.3	75.38
2 800 ~ 2 900	苔草(<i>Carex</i>), 马蔺(<i>Iris ensata</i>), 西北利亚早熟禾(<i>Pop sibirica</i>), 冰草(<i>Agropyron cristatum</i> L.), 黄花棘豆(<i>Oxytropis ochrocephala</i>), 萎陵菜(<i>Potentilla</i>)	0.65	49.6	77.25
2 900 ~ 3 000	苔草(<i>Carex</i>), 大针茅(<i>Stipa grandis</i>), 黄花棘豆(<i>Oxytropis ochrocephala</i>), 萎陵菜(<i>Potentilla</i>), 乳白香青(<i>Anaphalis lacteal</i>)	0.76	48.9	78.30

1.3 土壤 CO₂ 通量测定方法与试验设计

按不同海拔高度(2 500、2 600、2 700、2 800、2 900 和 3 000 m)在排露沟流域内选定植被和土壤相似,并具有一定代表性的固定地点选择样地(5 m × 5 m),这些地点主要反映了水分和植被的梯度变化,并尽可能地体现祁连山高山草甸的群落特征.在 2004 年生长季根据高山草甸物候的变化,采用美国 Li-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合作用测量系统和 6400-09 土壤呼吸室进行数据的采集和测量,在每种样地内随机放置 5 个土壤隔离圈(80 cm²,高度 4.4 cm)在每月 10 ~ 25 日对每种样地分别进行连

试验区域的主要林木为青海云杉,零星分布有金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、银露梅(*Dasiphora glabra*)、鲜黄小檗(*Berberis diphava*)、爬地柏(*Sabina vulgaris*)小灌木.试验高山草甸在海拔 2 500 ~ 3 000 m 的范围内,植物分布状况如表 1 所示,其物候变化情况从 5 ~ 10 月份依次为展叶期、显蕾期、开花期、果实成熟期、果实脱落期和黄枯期,土壤类型是为山地灰褐土,土壤厚度 1.0 m.

1.2 试验地点的代表性

祁连山区主要树种为青海云杉,其林线上限在海拔 3 300 m 的高度,下限约 2 300 m,海拔 2 500 ~ 3 000 m 主要以山地森林草地景观植被为主,而山区植被带的主体由亚高山灌丛林带与其下的山区森林草地带组成,它与冰雪冻土带的界限在海拔 3 600 m.高山草甸主要分布在海拔 2 500 ~ 3 000 m 内的山地森林草地景观植被带内^[18],其面积约占祁连山区面积的 28.27%^[19].所以研究这个海拔带内高山草甸的土壤 CO₂ 通量,可以进一步认识在高海拔低温环境条件下,土壤 CO₂ 释放通量及其对气候和土地利用变化的反馈作用.

续 2 d(48 h)的土壤 CO₂ 通量测定,每 h 对 5 个测点分别测定 1 次,每个测点记录 3 个观测数据.为了减小安放土壤隔离圈对土壤 CO₂ 通量的影响,在土壤 CO₂ 通量测定的前 1 周将土壤隔离圈埋入土壤大约 2 cm 左右,并且在每次测定前 1 d,将测定点土壤隔离圈内的地表植被自土壤表层彻底剪除,不破坏土壤,以减少土壤扰动及根系损伤对测量结果的影响.由于考虑到不同海拔高度物候期不同,所以在展叶期、显蕾期、开花期、成熟期和果实脱落期,从低海拔向高海拔观测,而在黄枯期,考虑到高海拔温度较低,则从高海拔向低海拔观测,以保证不同海拔物候

期的同步性.

在测定土壤 CO₂ 通量的同时, 利用便携式光合作用测量系统的温度探针测定 10 cm 土壤温度, 同时在每个样地用 TDR 测定土壤 10 cm 含水量; 用环刀法进行根系生物量的测定, 取样频率为每月 1 次, 即每次测定土壤 CO₂ 通量时测定 1 次根系生物量. 在当时测定过土壤 CO₂ 通量的样圆内, 将直径为 25 cm、高为 10 cm 的环刀砸入土层, 然后分别按 0~10 cm 和 10~20 cm 2 个层次依次取样. 取好样品, 按层分装在取样袋中, 编上样圆号和土层号, 带回室内; 捡去石块和杂物, 再用水冲洗, 然后以清水漂净、过筛; 晾干后放在大小适宜的纸袋中, 80℃ 烘干至恒重, 则得到 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的根系生物量.

土壤 CO₂ 通量与温度之间的关系采用 SPSS 12.0 统计分析软件进行分析, 动态曲线采用 Origin

Pro7.5 绘制.

2 结果与分析

2.1 高山草甸土壤 CO₂ 通量的空间变化

表 2 为生长季祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量的空间变化情况. 可见, 在整个生长季土壤 CO₂ 通量的最小值为 0.119 μmol·(m²·s)⁻¹, 最大值为 4.736 μmol·(m²·s)⁻¹, 空间变异系数均超过 50%.

由表 2 可见, 平均土壤 CO₂ 通量为 1.238~1.685 μmol·(m²·s)⁻¹, 不同海拔高度之间土壤 CO₂ 通量存在显著差异. 相对来说, 在海拔 2 500 m 高山草甸平均土壤 CO₂ 通量最大 [1.685 μmol·(m²·s)⁻¹], 2 600~2 900 m 次之, 3 000 m 最小 [1.238 μmol·(m²·s)⁻¹]. 这表明随着海拔梯度的增加, 土壤 CO₂ 通量逐渐减小.

表 2 不同海拔高度土壤 CO₂ 通量的变化/μmol·(m²·s)⁻¹

Table 2 Spatial variation in soil respiration based on different altitude /μmol·(m²·s)⁻¹

海拔 /m	年均气温 /℃	年均土壤 10 cm 含水量/%	土壤 CO ₂ 通量					
			年平均值	最小值	最大值	标准差	变异系数/%	样本数 ¹⁾
2 500	0.81	17.54	1.685	0.162	4.736	0.912	54.12	354
2 600	0.78	17.96	1.539	0.157	4.468	0.851	55.30	354
2 700	0.52	18.25	1.516	0.153	4.162	0.855	56.39	354
2 800	0.34	18.68	1.423	0.142	3.857	0.814	57.20	354
2 900	-0.15	19.83	1.357	0.135	3.716	0.785	57.85	354
3 000	-0.36	21.34	1.238	0.119	3.654	0.720	58.16	354

1) 样本数为 1 个样地中 5 个随机测点的观测平均值

因为变异系数消除了量纲的影响, 所以能用于不同海拔高度之间的比较. 从表 2 的空间变异系数来看, 不同海拔高度土壤 CO₂ 通量的空间变异存在一定的差异, 表现在随海拔的升高其变异系数也逐渐增加(54.12%~58.16%). 可见由于海拔梯度的增加, 影响土壤 CO₂ 通量的环境因子也发生了变化, 从而在一定程度上引起了土壤 CO₂ 通量在一定范围内的波动, 表现出变异系数的逐渐增加.

2.2 高山草甸土壤 CO₂ 通量的时间变化

2.2.1 土壤 CO₂ 通量的日变化

选取 6 月份不同海拔土壤 CO₂ 通量在 24 h 的变化数据可以看出, 在生长季节, 祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量日变化呈如下特征: 晚间维持在较低水平, 02:00~06:00 最低, 在 07:00~08:30 开始升高, 11:00~16:00 达到最大值, 16:00~18:30 开始下降, 整个过程呈单峰曲线(图 1), 开始升高到开始下降的时间间隔(以 2004-06 测定数据为例): 2 500 m 为 14.2 h, 2 600 m 和 2 700 m 为 13 h, 2 800 m 和 2 900 m

为 12.5 h, 3 000 m 为 11.8 h.

在不同的生长季节土壤 CO₂ 通量的日平均值也存在差异(表 3). 土壤 CO₂ 通量的日平均值 5 月份介于 (0.83 ± 0.53)~(1.22 ± 0.65) μmol·(m²·s)⁻¹, 6 月份为 (1.54 ± 0.71)~(2.18 ± 0.58) μmol·(m²·s)⁻¹, 7 月份为 (1.85 ± 0.73)~(2.53 ± 0.76) μmol·(m²·s)⁻¹, 之后逐渐下降, 8 月份为 (1.51 ± 0.57)~(2.25 ± 0.63) μmol·(m²·s)⁻¹, 9 月份为 (1.25 ± 0.78)~(1.76 ± 0.87) μmol·(m²·s)⁻¹, 10 月份降到 (0.56 ± 0.32)~(0.96 ± 0.51) μmol·(m²·s)⁻¹. 在观测期间, 土壤 CO₂ 通量的日平均最小值出现在 4 月份, 为 (0.83 ± 0.53) μmol·(m²·s)⁻¹, 最大值出现在 7 月份, 为 (2.53 ± 0.76) μmol·(m²·s)⁻¹.

2.2.2 土壤 CO₂ 通量的季节变化

对祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量的连续观测结果表明(图 2, 表 3), 在整个生长季由于昼夜变化及各种环境因子的影响, 土壤 CO₂ 通量呈不规律的

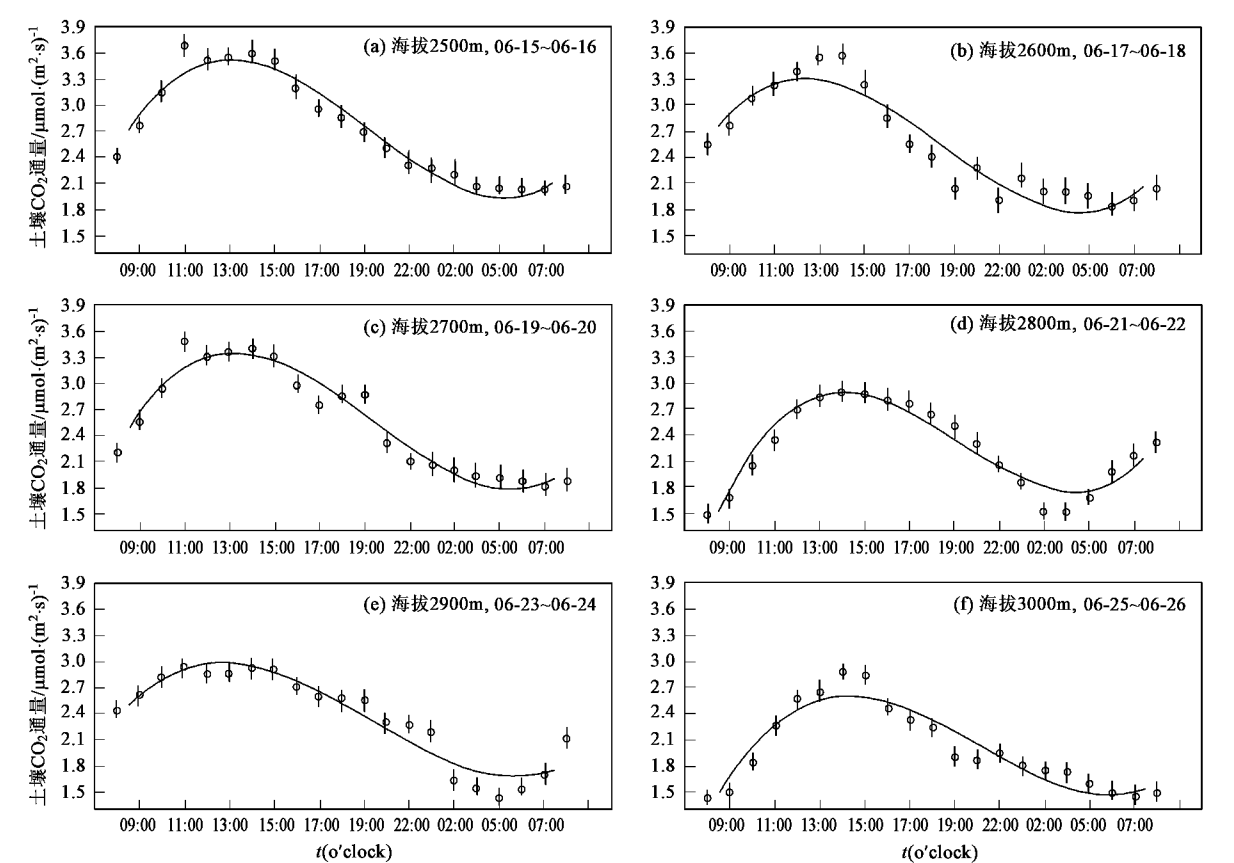


图 1 不同海拔高度土壤 CO₂ 通量的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of soil respiration rate in different altitude of Qilian Mountains

表 3 生长季平均土壤 CO₂ 通量/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

Table 3 Average of soil respiration rate at growth season / $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

月份	2 500 m	2 600 m	2 700 m	2 800 m	2 900 m	3 000 m
5	1.22 ± 0.65	1.15 ± 0.59	1.12 ± 0.84	1.01 ± 0.64	0.97 ± 0.61	0.83 ± 0.53
6	2.18 ± 0.58	2.09 ± 0.69	2.06 ± 0.95	1.87 ± 0.87	1.79 ± 1.01	1.54 ± 0.71
7	2.53 ± 0.76	2.51 ± 0.84	2.49 ± 0.97	2.26 ± 0.88	2.16 ± 1.13	1.85 ± 0.73
8	2.25 ± 0.63	2.13 ± 0.71	2.03 ± 0.76	1.84 ± 0.69	1.76 ± 0.97	1.51 ± 0.57
9	1.76 ± 0.87	1.71 ± 0.58	1.69 ± 1.04	1.53 ± 0.94	1.46 ± 0.89	1.25 ± 0.78
10	0.96 ± 0.51	0.83 ± 0.47	0.75 ± 0.43	0.68 ± 0.39	0.62 ± 0.35	0.56 ± 0.32

多峰曲线,但总的变化趋势是在生长季初期(5 月份)土壤 CO₂ 通量较低,到 6 月份逐渐升高,7~8 月份达到最大值的 4.736 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ [图 2(a)],9 月份开始下降,整个生长过程总的变化趋势呈单峰曲线形式。

2.3 高山草甸土壤 CO₂ 通量与水热因子及根系生物量的关系

祁连山高山草甸的土壤 CO₂ 通量及其影响因子都存有一定程度的空间变异,且随着季节的变化,表现出一定规律性.通过对海拔 2 900 m 高山草甸土壤 CO₂ 通量的变化(表 4)可以看出,其变异系数最

低值为 52.4%,最高值为 76.8%.从 5 月份开始,土壤 CO₂ 通量的变异系数逐渐降低,在 7 月份降至最低值,随后又逐渐增高.各影响因子的空间变异情况也有一定的差别.5 月份以后,由于祁连山气候条件的转暖,温度的变异系数开始上升,从开始的 12.25%上升到生长末期的 38.67%.水分变异系数的变化范围在 65.87%~201.34%之间,表现出一定的季节变化规律.根系生物量的空间变异比较平稳,其变异系数一直在 70%左右波动。

2.3.1 土壤 CO₂ 通量与土壤温度(10 cm)的关系

非线性回归分析表明,指数模型同样能够较好

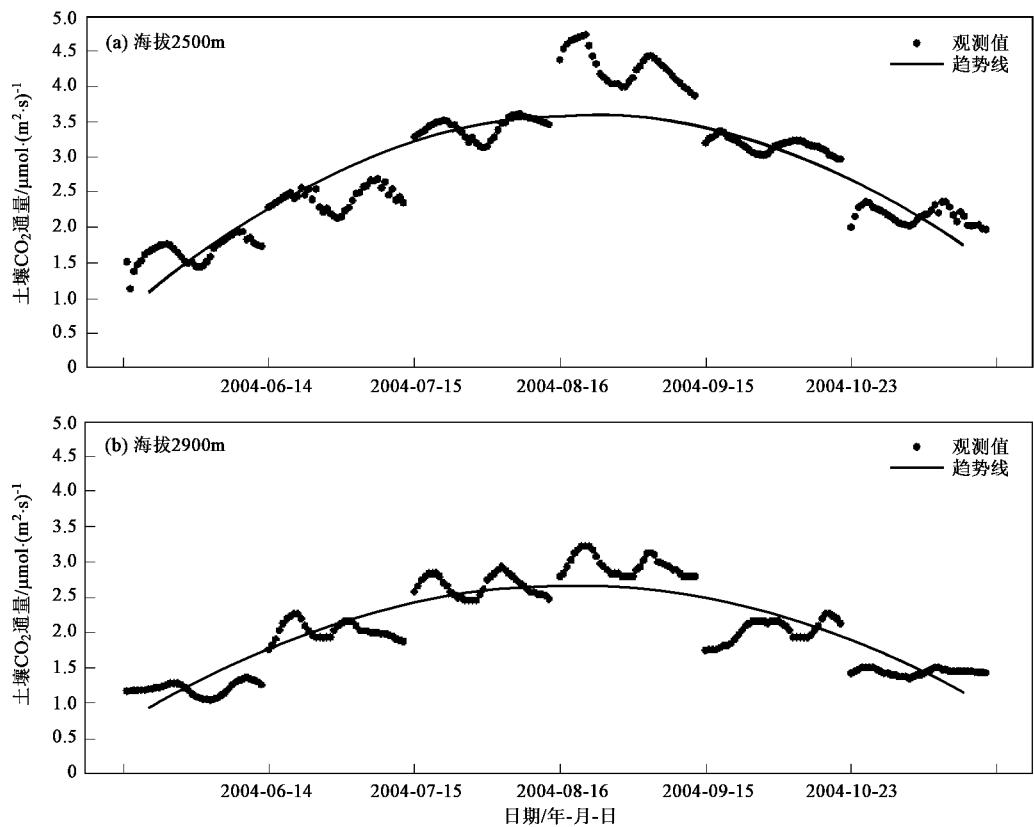


图2 祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量的季节动态

Fig.2 Seasonal patterns of soil respiration rate in the alpine meadow of Qilian Mountains

表4 土壤 CO₂ 通量及环境因子的平均值和变异系数(海拔 2 900 m)

Table 4 Means and coefficients of variance of soil respiration and environmental factor (2 900 m)

月份	土壤 CO ₂ 通量		土壤含水量(0~10 cm)		根系生物量(0~10 cm)		温度			
	$I/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$		Mean/%		Mean/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$		气温		土壤温度(10 cm)	
	Mean	CV/%	Mean/%	CV/%	Mean/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	CV/%	Mean/ $^{\circ}\text{C}$	CV/%	Mean/ $^{\circ}\text{C}$	CV/%
5	0.97	63.4	35.695	65.87	136.8	69.3	4.98	12.25	5.12	14.32
6	1.79	56.0	17.559	84.25	157.1	75.4	17.28	21.33	13.86	17.56
7	2.16	52.4	13.775	114.36	168.3	71.3	15.18	18.67	16.1	25.61
8	1.76	55.3	16.03	156.37	169.2	68.5	16.85	32.54	16.4	23.54
9	1.46	61.6	13.955	201.34	173.1	67.6	9.65	38.67	10.03	16.57

地描述祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量与土壤温度(10 cm)之间的关系如图 3(a).经统计分析,高山草甸土壤 CO₂ 通量(S)与温度(t)的相关性显著($p < 0.001$),其回归关系为:

$S = 0.6907e^{0.1235t}$ ($p < 0.001$, $R^2 = 0.8008$)

2.3.2 土壤 CO₂ 通量与土壤水分(10 cm)之间的关系

祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量与土壤含水量(10 cm)之间的变化趋势并不一致[图 3(b)].在土壤含水量较低时,土壤 CO₂ 通量的变化几乎与土壤含水量的变化同步,即随着土壤水分含量的增加,土壤 CO₂ 通量也随着增加,但是当土壤水分含量增加到

一定程度时,土壤 CO₂ 通量的增加比较缓慢.分析的结果表明,当祁连山高山草甸土壤水分含量小于 30.2%时,土壤 CO₂ 通量随水分含量的增加而增加,且遵从曲线方程 $S = -5.869e^{-0.102t} + 5.274$, ($p = 0.189$, $R^2 = 0.944$);当土壤水分含量大于 30.2%时,随土壤水分含量的增加土壤 CO₂ 通量呈线性增长趋势,其拟合方程为: $S = 0.0038t + 4.8192$, ($p < 0.001$, $R^2 = 0.46$).

2.3.3 土壤 CO₂ 通量与根系生物量(0~10 cm)之间的关系

在每次测定中,不同取样点的土壤 CO₂ 通量与根系生物量(0~10cm)之间基本上呈正相关($p <$

0.01, $R^2 = 0.245$) 关系[图 3(c)], 但是相关系数较低且在每次测定间的变异很大(表 4), 表明土壤 CO_2 通量除受根系生物量影响之外, 还受到其它因子, 如温度和土壤湿度等在不同取样点之间异质性的影响。

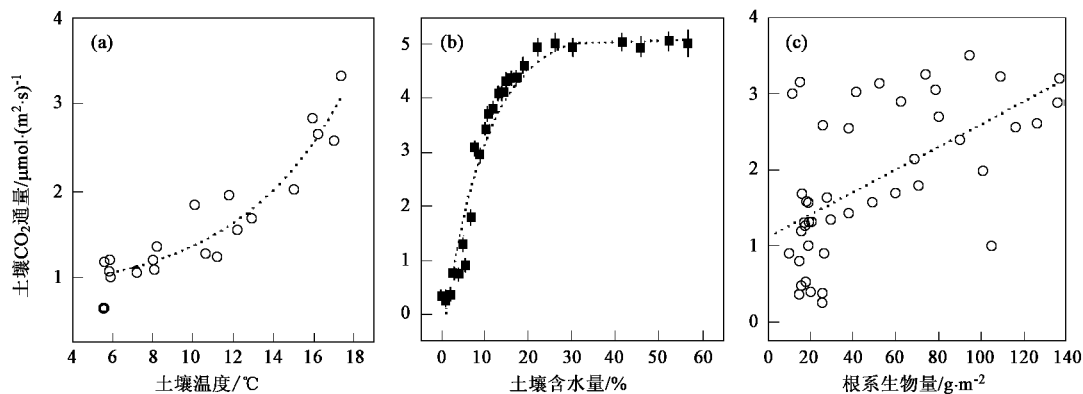


图 3 土壤 CO_2 通量与水热因子及其根系生物量的关系

Fig. 3 Influence of soil temperature, soil moisture and root on soil CO_2 efflux

3 讨论

土壤 CO_2 通量的空间变异在各种尺度上都存在. Raich 等^[2]综合了全球范围内土壤 CO_2 通量的实测数据, 指出了土壤 CO_2 通量平均速率在不同植被类型之内和之间都存在着很大的差异, 最寒冷(苔原)和最干旱(荒漠)的生态系统中, 土壤 CO_2 通量最低, 而最高速率出现在全年温度和水分有效性都最高的热带雨林; 而且在多数生态系统内部, 其变异系数都超过了 10%. Russell 等^[20]在一个成熟的白杨林内, 沿着 1 条 40 m 的样线, 每隔 2~4 m 取样 1 次, 发现土壤 CO_2 通量的变异系数在 16%~45% 之间. 笔者在祁连山对高山草甸研究得到的结果是, 土壤 CO_2 通量的变异系数都超过了 50%, 不同海拔梯度之间的土壤 CO_2 通量存在着较大的变异, 且这种变异具有一定的季节差异。

祁连山高山草甸土壤 CO_2 通量日变化呈现明显的昼夜规律, 表现在夜间土壤速率维持在较低的水平, 白天较高. 日变化过程为单峰曲线, 这与崔晓勇等^[21-24]在草地的研究结论相类似. 即在一昼夜内, 不同时间土壤 CO_2 通量的速率不同, 在相同的土壤中, 不同月份, 土壤 CO_2 通量的高低峰值出现的时间也不相同。

祁连山高山草甸土壤 CO_2 通量的测定, 为估算祁连山区高山草甸的土壤 CO_2 通量提供依据. 测定结果表明, 高山草甸土壤 CO_2 通量的最大值为 4.736

从以上分析可以看出, 高山草甸土壤 CO_2 通量的空间变异与其水热因子及根系生物量之间有着一定的相关关系. 说明从整个生长季来看, 土壤 CO_2 通量在整个祁连山高山草甸内的空间差异主要受温度状况、水分状况和根系生物量的综合控制。

$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 最小值为 $0.119 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 比 Michael 等^[25]测定的草地的土壤 CO_2 通量的日均值低, 他们在加拿大安大略湖北部的草地生态系统测定: 草地土壤 CO_2 通量的最大值为 $5.70 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 最小为 $2.32 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 但在高海拔地区高山草甸土壤 CO_2 通量的研究目前比较鲜见, 本研究观测计算表明, 祁连山高山草甸日平均土壤 CO_2 通量介于 $(0.56 \pm 0.32) \sim (2.53 \pm 0.76) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 之间。

关于引起土壤 CO_2 通量空间变异的原因, 不同的研究者得到的结论有些差别. Raich 等^[2]发现在全球尺度上, 不同生物群系(Biome)的年土壤 CO_2 通量同温度、水分和生物量有着很好的线性关系. Fang 等^[1]认为生物量的大小控制着土壤 CO_2 通量的空间分布, 而温度和水分的影响则可以忽略不计. Xu 等^[26]的研究结果是, 根系和微生物生物量、土壤理化性质、土壤温度和水分等因素同土壤 CO_2 通量的空间变异高度相关. 笔者在祁连山高山草甸研究的结果是, 土壤 CO_2 通量与温度、水分高度相关, 根系生物量对土壤 CO_2 通量的空间变异也有着重要的影响。

4 结论

(1) 整个生长季祁连山高山草甸土壤 CO_2 通量的空间变化为: 随着海拔高度的增加, 土壤呼吸速率逐渐减小, 其变异系数逐渐增加 (54.12% ~

58.16%)。

(2)祁连山高山草甸生长季节土壤 CO₂ 通量晚间维持在较低水平,02:00~06:00 最低,在 07:00~08:30 开始升高,11:00~16:00 达到最大值,16:00~18:30 开始下降,整个过程呈单峰曲线。不同的生长季节土壤呼吸速率的日平均最小值出现在 4 月份,为(0.83±0.53) μmol•(m²•s)⁻¹,最大值出现在 7 月份,为(2.53±0.76) μmol•(m²•s)⁻¹。

(3)在整个生长季土壤 CO₂ 通量呈不规则的多峰曲线,但总的变化趋势是 7~8 月份达到最大值[4.736 μmol•(m²•s)⁻¹],6 月与 9 月份次之,5 月与 10 月份基本一致,整个生长过程总的变化趋势呈单峰曲线形式。

(4)在整个生长季,祁连山高山草甸土壤 CO₂ 通量在祁连山的空间变异主要受温度、水分和植物根系的综合影响。

参考文献:

[1] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its variation in Florida slash pine plantation [J]. *Plant and Soil*, 1998, **205**: 135 ~ 146.

[2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, **44B**: 81 ~ 89.

[3] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局[J]. *环境科学*,2003, **24**(6): 23 ~ 32.

[4] Aiken R M, Jawson M D, Grahmmer K, *et al.* Positional, spatially correlated and random components of variability in carbon dioxide efflux [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, **20**: 301 ~ 308.

[5] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, **9**: 23 ~ 36.

[6] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant and Soil*, 1997, **190**: 127 ~ 141.

[7] Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory controlled moisture and temperature conditions [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998,**30**: 1591 ~ 1597.

[8] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998,**4**: 217 ~ 227.

[9] Li L H, Han X G, Wang Q B, *et al.* Correlations between plant biomass and soil respiration in a *Leymus chinensis* community in the

Xilin River Basin of Inner Mongolia [J]. *Acta Bot Sin*, 2002, **44** (5): 593 ~ 597.

[10] 刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. *生态学报*, 1997, **17**(5): 469 ~ 476.

[11] 宋长春,杨文燕,徐小锋,等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放动态及影响因素[J]. *环境科学*,2004, **25**(4): 1 ~ 6.

[12] 王跃思,纪宝明,黄耀,等. 农垦与放牧对内蒙古草原 N₂O、CO₂ 排放和 CH₄ 吸收的影响[J]. *环境科学*,2001, **22**(6): 7 ~ 13.

[13] 徐世晓,赵新全,李英年,等. 青藏高原高寒灌丛 CO₂ 通量日和月变化特征[J]. *科学通报*,2005, **50**(5): 481 ~ 485.

[14] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, **32**: 35 ~ 45.

[15] Garrett H E, Cox G S. Cardon dioxide evolution from the floor of an oak- hickory forest [J]. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 1973, **37**: 641 ~ 644.

[16] Hanson P J, Wullschlegler S D, Bohlman S A, *et al.* Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest [J]. *Tree Physiology*, 1993, **13**: 1 ~ 15.

[17] 常宗强,史作民,冯起,等. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响[J]. *应用生态学报*, 2005, **16** (9): 1603 ~ 1606.

[18] 李英年,赵新全,赵亮,等. 祁连山海北高寒湿地气候变化及植被演替分析[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(3): 243 ~ 249.

[19] 宋克超,康尔洒,金博文,等. 黑河流域山区植被带草地蒸散发试验研究[J]. *冰川冻土*,2004, **26**(3): 349 ~ 356.

[20] Russel C A, Voroney R P. Carbon dioxide efflux from the of a boreal aspen forest. I . Relationship to environmental variables and estimates of C respired [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, **78**: 301 ~ 310.

[21] 崔骁勇,陈佐忠,陈四清. 草地土壤呼吸研究进展[J]. *生态学报*,2001, **21**(2): 315 ~ 325.

[22] 李凌浩,王其兵,白永飞,等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J], *植物生态学报*,2000, **24**(6): 680 ~ 686.

[23] 贾丙瑞,周广胜,王凤玉,等. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子[J]. *环境科学*,2005, **26**(6): 1 ~ 7.

[24] 曹广民,李英年,张金霞,等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量[J]. *环境科学*,2001, **22**(6): 14 ~ 19.

[25] Michael F L, Duchesne L C, Wetzel S. Effect of rainfall patterns on soil surface CO₂ efflux, soil moisture, soil temperature and plant growth in a grassland ecosystem of northern Ontario, Canada: implications for climate change[J]. *BMC Ecology*, 2002, **2**(10): 1 ~ 6.

[26] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young Ponderosa Pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 667 ~ 677.