

克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 草原土壤呼吸及其影响因子

师广旭^{1,2}, 耿浩林^{1,2}, 王云龙^{1,2}, 王玉辉^{1,3,*}, 齐晓荣⁴

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国气象局大气环境研究所, 沈阳 110016; 4. 内蒙古锡林浩特市草原监督管理局, 锡林浩特 026002)

摘要: 基于 LI6400-09 便携式光合作用测量系统的土壤呼吸观测系统对内蒙古克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 草原 2005 年 5 月至 9 月的土壤呼吸作用的测定结果, 研究了克氏针茅草原土壤呼吸速率的日、生长季动态及其控制因子。结果表明, 在生长季节, 克氏针茅草原土壤呼吸速率的日季动态均呈单峰型变化; 日最大值和最小值分别出现在 10:00 ~ 13:00 和凌晨 4:00 左右; 生长季日均最大值 ($0.14 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 出现在 6 月份, 日均最小值 ($0.03 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 出现在 8 月份。在日尺度上, 随着生长期的变化, 控制土壤呼吸作用的环境因子有所不同; 在生长初期和末期土壤呼吸速率的限制因子主要为总辐射, 而在生长中期, 控制因子则为气温和土壤含水量。在整个生长季的尺度上, 极显著影响土壤呼吸作用的环境因子则为土壤含水量 (0 ~ 10cm、10 ~ 20cm、20 ~ 30cm)、总辐射和气温。约有 72% 的土壤呼吸作用生长季变异是由表层土壤含水量和总辐射共同决定的, 其中 0 ~ 10cm 土壤含水量是影响克氏针茅草原土壤呼吸作用在生长季节变化的主导环境因子, 可以单独解释土壤呼吸作用变异的 51%。

关键词: 克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 草原; 土壤呼吸; 环境影响因子

文章编号: 1000-0933(2008)07-3408-09 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Daily and seasonal dynamics of soil respiration and their environmental controlling factors in *Stipa krylovii* steppe

SHI Guang-Xu^{1,2}, GENG Hao-Lin^{1,2}, WANG Yun-Long^{1,2}, WANG Yu-Hui^{1,3,*}, QI Xiao-Rong⁴

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China,

3 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China

4 Xilinhot Grassland Administration, Xilinhot 026002, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3408 ~ 3416.

Abstract: Soil respiration was measured by using a Li6400-09 soil respiration chamber from May to September 2005 in *Stipa krylovii* steppe, Inner Mongolia. Environmental variables including air temperature, total radiation, soil temperature and soil water content were also measured during the same period. Our results showed that daily variations of soil respiration could be characterized by a mono-peak pattern. The highest soil respiration rates occurred in between 10:00am and 13:00 pm, and the lowest at about 4:00 am. Seasonal changes of soil respiration can also be described by a mono-peak pattern with the highest ($0.14 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in June and the lowest ($0.03 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in August. While air temperature, soil water content, and total radiation determined both daily and seasonal changes of soil respiration, we found a significant

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2006CB400502); 国家自然科学基金资助项目 (40671183; 40625015)

收稿日期: 2007-11-17; **修订日期:** 2008-04-22

作者简介: 师广旭 (1983 ~), 男, 山东兖州人, 硕士生, 主要从事草原生态系统碳循环研究. E-mail: shigx98@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhwang@ibcas.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Fundamental and Key Project of China (No. 2006CB400502) and National Natural Science Foundation of China (No. 40671183; 40625015)

Received date: 2007-11-17; **Accepted date:** 2008-04-22

Biography: SHI Guang-Xu, Master candidate, mainly engaged in carbon cycle of steppe ecosystem. E-mail: shigx98@163.com

correlation in the seasonal changes that can be modeled as $R = 0.011W_1 - 0.005W_2 + 6.117 \times 10^{-5}D + 0.038$ ($R^2 = 0.72$, $P < 0.001$), where R is the soil respiration rate, D is the radiation, and W_1 , W_2 are soil water contents in the depth of 0–10, 10–20 respectively. The soil water content at the 0–10 cm depth was found a dominating factor that can account for 51% of the seasonal variation of soil respiration.

Key Words: *Stipa krylovii* steppe; soil respiration; environmental controlling factors

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环中的重要环节,是土壤与大气之间碳交换的主要输出途径。草地生态系统作为全球分布最为广泛的植被类型之一,由于其独特的生物地球化学循环特征:地上碳库不明显,碳素主要集中于土壤中,使得草地生态系统土壤呼吸作用的研究在全球碳循环研究中占有十分重要的地位和作用。草地土壤呼吸的研究始于上世纪初,主要集中在北美温带草原^[1~3]和印度、澳大利亚热带草原^[1],并且在爱尔兰岛^[4]、日本^[5]、巴西^[6]、欧洲大陆^[7]等地的草原地区也进行了一些相关研究。而我国草地土壤呼吸的研究起步较晚,直至上世纪末才开始逐步在东北羊草草原^[8,9]、内蒙古温带草原^[10~30]、以及青藏高原高寒草甸草原^[31,32]等开展了相关研究工作。有关草原生态系统土壤呼吸的研究主要集中在以下方面:通过各种技术手段观测土壤呼吸的日动态、月动态以及年动态^[8~10,13,16,17,19,20];量化分析影响土壤呼吸变化的各种环境因子和生物因子^[6,12,16,19,21~23,30];研究人工控制下的环境因子对土壤呼吸的影响^[2,3];对比分析不同土地利用方式或不同类型草原生态系统土壤呼吸的异同^[7,15,20,25~27,31],区分根系呼吸和微生物呼吸对土壤呼吸的贡献^[4,5,24,26,28,32];建立各种数学模型用于模拟土壤呼吸的变化和估算土壤呼吸产生的速率和总量^[14,17~19,21]。尽管目前有关土壤呼吸已经开展了大量的研究工作,但由于土壤呼吸作为一种复杂的生物学过程,是生物因素和非生物因素综合作用的产物。对于不同草地代表性类型土壤呼吸作用的影响因素及类型间土壤呼吸变异性的了解仍十分有限^[33,34,36]。

典型草原是温带内陆半干旱气候条件下形成的草地类型,主要包括羊草草原、大针茅草原、克氏针茅草原、羊茅草原等,总面积 $4.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占全国草地总面积的 10.5%, 主要分布于呼伦贝尔高平原的西部、锡林郭勒高平原的大部分地区以及阴山北麓、大兴安岭南麓、西辽河平原等地^[35]。目前关于典型草原土壤呼吸的研究主要集中在羊草草原和大针茅草原^[10~30], 而克氏针茅草原作为典型草原中生境比较干旱的类型,对于其土壤呼吸作用的研究仍较少^[10,11]。研究已表明不同草原类型由于其物种组成、植被结构、土壤理化性质以及土壤微生物的数量、种类、活性等特征的不同,导致土壤呼吸时间变化动态及其对环境因子的响应是不同的^[3,10,11,36], 因此,系统研究克氏针茅草原在不同时间尺度上的变化动态及其主要环境影响因子,对于全面认识典型草原土壤呼吸,提高温带草原碳收支评估的准确性具有重要意义。

为此,本研究选取我国内蒙古锡林郭勒盟典型草原区内的克氏针茅草原作为研究对象,基于整个生长季的野外动态监测数据,在分析克氏针茅草原土壤呼吸作用的日、生长季动态的基础上,揭示影响土壤呼吸作用主导环境因子,为定量、准确地评估克氏针茅草原碳收支提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点

观测样地设在中国气象局沈阳大气环境研究所内蒙古典型草原生态系统野外观测站($44^{\circ}07'N$, $116^{\circ}19'E$, 海拔 1030m), 于 2003 年围栏禁牧。该站点处于内蒙古典型草原区的中心地带,在锡林浩特市以东 23km 处。该区的气候类型为温带半干旱大陆性气候,春季风大少雨,蒸发旺盛,日照充沛;夏季温暖,雨热同季;秋季短促,气温骤降;冬季寒冷而漫长;年均气温 $-0.1^{\circ}C$ 。7 月份平均气温 $18.3^{\circ}C$, 1 月份平均气温 $-22.0^{\circ}C$, 全年 $\geq 10^{\circ}C$ 积温为 $1750^{\circ}C$, 全年日照数 2 600h, 无霜期 90~110d, 年降水 300mm 左右。土壤主要为典型栗钙土, 0~50cm 土壤有机质含量 3.6%~1.5%^[37]。观测样地主要植物种类有克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Leymus chinensis*)、糙隐子草(*Cleistogens squarrosa*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)、洽草(*Koeleria cristata*)、还有一

些葱属的植物,如:双齿葱(*Allium bidentatum*)、细叶葱(*Allium tenuissimum*)、蒙古葱(*Allium mongolicum*)等。

1.2 土壤呼吸作用的测定方法

试验采用 LI-6400 便携式气体分析系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)和 LI-6400-09 土壤呼吸室每月进行 1 次土壤呼吸作用测定(2005 年 5~9 月)。每次在测量前一天,选择地上植被类型一致但丰度差异比较大的 12 个样点,打下 12 个土壤环(材质为聚氯乙烯,直径 10cm,高 12cm,打入土壤 10cm,露出地面 2cm);同时齐地表将土壤环内植被剪取,分植物种装入不同的信封,同时分别收集立枯和凋落物,并将环内土壤表面清理干净。测量过程中首先对 LI6400-09 土壤呼吸作用测定系统进行调零并设定参数,12 个土壤环依次进行观测,全部完成共需约 1h。

1.3 测定时间

在 2005 年克氏针茅草原生长季进行土壤呼吸速率观测,时间分别为 5 月 15 日、6 月 20 日、7 月 23 日、8 月 29 日和 9 月 24 日。每个观测日都在 6:00~18:00 之间进行日动态观测,每 2h 进行 1 次测量,其中在 6 月 20 日(8:00~次日 6:00)和 7 月 23 日(6:00~次日 4:00)进行了 24h 观测。

1.4 环境因子观测

土壤温度数据和湿度(体积比)数据分别来自于观测样地小气候梯度系统的 107 土壤温度传感器(7 层 0,5,10,15,20,30,40,80cm,Campbell Scientific, 美国)和 EasyAG50 多点土壤水分探头(4 层 10,20,30,50cm, Sentek 公司,澳大利亚)。空气温度和湿度以及总辐射的数据来自于小气候梯度系统的 HMP45C 温湿度传感器(1.5m,Vaisala 公司,芬兰)及总辐射传感器 TBQ-2-B。观测频率为 0.5h,全年连续观测。

1.5 数据处理。

数据处理和作图通过 Microsoft Office Excel 2003 和 Spss 13.0 软件包完成。

2 结果和分析

2.1 土壤呼吸作用日动态

图 1 给出了 2005 年生长季节(5 月 15 日、6 月 20 日、7 月 23 日、8 月 29 日和 9 月 24 日)土壤呼吸速率的日变化规律及其相对应的环境因素,包括空气温度、5cm 土壤温度、0~10cm 土壤含水量和总辐射。可以看到,生长季节中各观测日的克氏针茅草原土壤呼吸作用日动态均表现为单峰曲线变化,土壤呼吸速率峰值出现在 10:00~13:00,最小值出现在凌晨 4:00 左右。各观测日土壤呼吸速率最大值分别是($0.12\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.20\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.17\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.05\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.13\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$),相对应的最小值分别是($0.06\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.08\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.06\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.01\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $0.03\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。

2.2 土壤呼吸作用日动态的控制因子

对各观测日克氏针茅草原土壤呼吸速率与主要环境因子,包括空气温度、5cm 土壤温度、10cm 土壤温度、15cm 土壤温度、20cm 土壤温度、0~10cm 土壤含水量、10~20cm 土壤含水量、20~30cm 土壤含水量以及总辐射作多元线性逐步回归分析(表 1),结果表明在生长初期的 5 月 15 日和生长末期的 9 月 24 日土壤呼吸作用主要受总辐射的影响,而在植物生长比较旺盛的 6~8 月间土壤呼吸主要受到温度和水分的作用。其中 6 月 20 日、8 月 29 日的土壤呼吸作用主要受到土壤水分的影响,而 7 月 23 日的土壤呼吸作用是空气温度控制的结果。因为总辐射是大气和土壤温度变化的主要驱动因素^[38],为了进一步判断总辐射是否通过改变温度和水分来影响生长季初期和末期的土壤呼吸速率,去除总辐射因子的情况下对土壤呼吸的主要影响因子进行了逐步回归分析,表明,温度和水分均没能与土壤呼吸速率产生显著关系。

2.3 生长季土壤呼吸作用动态

克氏针茅草原整个生长季节的土壤呼吸动态变化如图 2 所示,呈现为单峰型变化,观测期间日均最大值($0.14\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)出现在 6 月份,日均最小值($0.03\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)出现在 8 月份,9 月份又有所回升,但并未达到 7 月份的日均呼吸速率。可能的原因是:6、7 月份是试验样地 2005 年生长季水热条件最好的时期。从图 1 可以看出,7 月 23 日,0~10cm 土壤湿度平均值(9.3%)远小于 6 月 20 日(18.2%),而白天最高气温

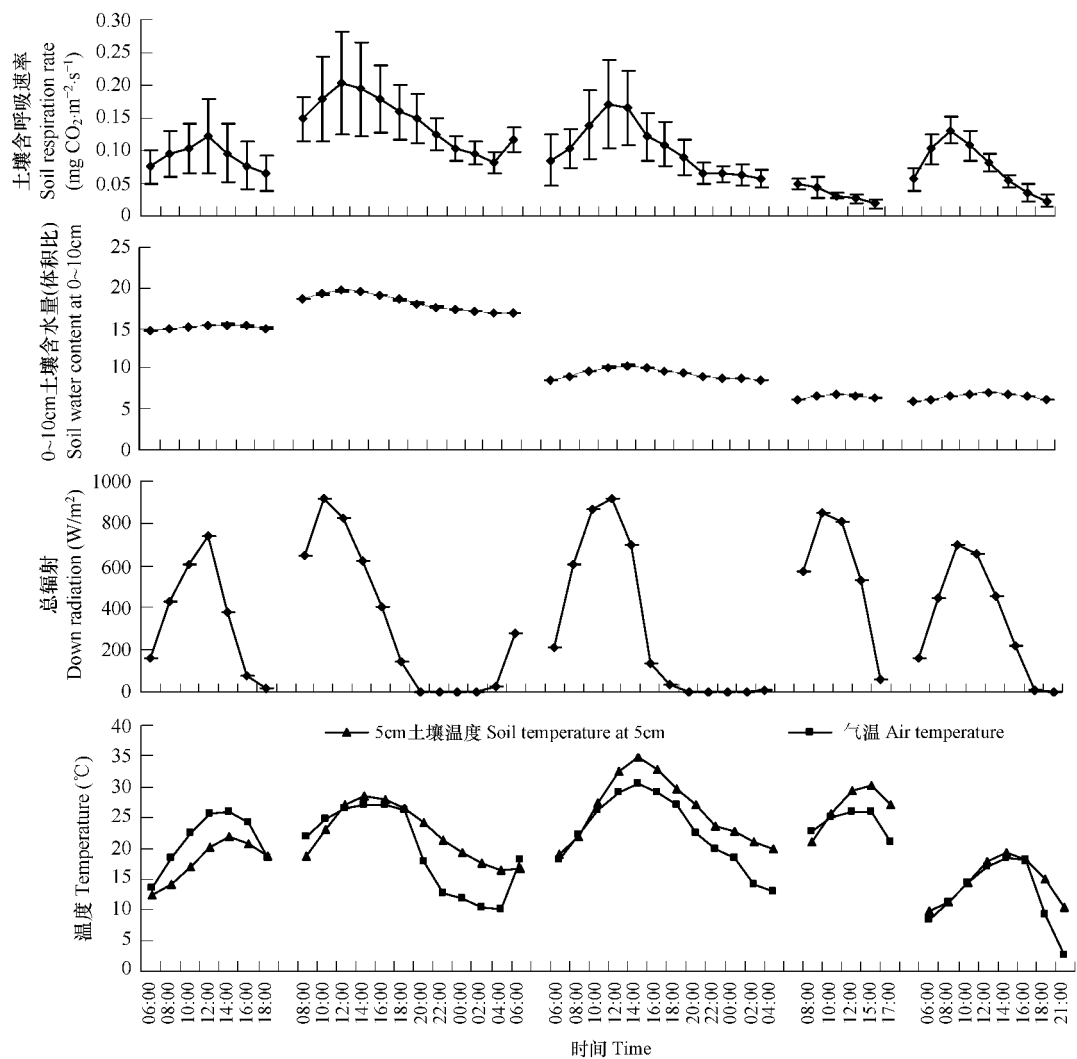


图1 克氏针茅草原土壤呼吸速率、空气温度、5cm 土壤温度、0~10cm 土壤含水量和总辐射在(从左到右)5月15日、6月20日、7月23日、8月29日和9月24日的日动态

Fig.1 Diurnal dynamics of soil respiration rate、air temperature、soil temperature at 5cm、soil water content at 0—10cm and total radiation at the different days(from left to right: May 15、June 20、July 23、August 29 and September 24)

表1 各观测日土壤呼吸速率与环境因子的多元逐步回归分析

Table 1 Stepwise regression of soil respiration rate and environmental factors at different days

日期 Date	回归方程 Regression equation	R^2	P
5月15日 May 15	$R = 9.90 \times 10^{-5} D + 0.08$	0.89	< 0.01
	$R = 8.42 \times 10^{-5} D + 0.039 W_1 - 0.51$	0.99	< 0.01
6月20日 June 20	$R = 0.038 W_1 - 0.54$	0.93	< 0.01
7月23日 July 23	$R = 0.006 T_a - 0.033$	0.82	< 0.01
	$R = 4.89 \times 10^{-5} D + 0.004 T_a - 0.003$	0.94	< 0.01
8月29日 August 29	$R = 0.038 W_2 + 0.54$	0.97	< 0.01
9月24日 September 24	$R = 1.32 \times 10^{-4} D + 0.029$	0.95	< 0.01
	$R = 1.30 \times 10^{-4} D + 0.53 W_3 - 7.34$	0.98	< 0.01

R :土壤呼吸速率 Soil respiration rate ($\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$); D :总辐射 Total radiation (W/m^2); W_1 、 W_2 、 W_3 :0~10cm、10~20cm、20~30cm; 土壤含水量 Soil water content at (0~10cm、10~20cm、10~30cm) (%) ; T_a :气温 Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)

(31℃)却高于6月20日(27℃),高温促进了土壤蒸发和植物蒸腾,进一步加剧了干旱,过低的土壤水分抑制了根系和微生物呼吸,从而使观测期间的峰值出现在6月20日;8月29日和9月24日相比,0~10cm土壤湿度平均值分别是6.6%和6.4%,都接近于萎焉点6%,但是8月29日白天最高气温(26℃)高于9月24日(18℃),同时分析生长季降水资料发现,8月29日前12d没有降水,而9月24日前1d有一次2.4mm的降水,高温和缺少降水进一步加剧了干旱,抑制了土壤呼吸。因此,观测期间最低值出现在8月29日而不是生长季末期的9月24日。

2.4 生长季土壤呼吸动态的主导影响因子

在整个生长季(表2),空气温度、总辐射、0~10cm土壤含水量、10~20cm土壤含水量以及20~30cm土壤含水量与土壤呼吸的相关性达到了极显著,5cm表层土壤温度与土壤呼吸之间达到了显著相关。0~10cm土壤含水量成为制约土壤呼吸在整个生长季变化的主要环境因子,其与土壤呼吸之间存在着极显著的对数相关关系($p < 0.001$),可以解释土壤呼吸变异的51%(图3)。温度对土壤呼吸的作用次于土壤水分,气温的月份间变化可单独解释土壤呼吸变异的25%(图3),其与土壤呼吸之间的模拟关系为极显著的二次方程($p < 0.001$)。总辐射对土壤呼吸整个生长季动态的影响,小于水分和温度,仅可解释土壤呼吸变异的19%,其与土壤呼吸之间呈现极显著的线性相关关系($p < 0.001$)(图3)。

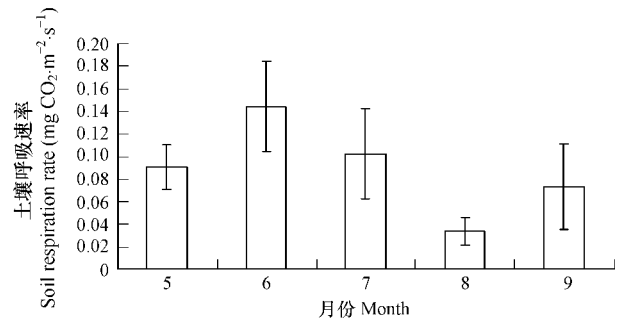


图2 克氏针茅草原土壤呼吸速率生长季动态

Fig. 2 Dynamics of soil respiration rates during the growing season in *Sipa krylovii* steppe

表2 生长季土壤呼吸速率与环境因子之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of soil respiration rates with environmental factors during the growing season

气温 Air temperature (°C)	总辐射 Total radiation (W/m ²)	土壤温度 Soil temperature (°C)				土壤含水量 Soil water content (%)		
		5cm	10cm	15cm	20cm	0~10cm	10~20cm	20~30cm
0.49 **	0.44 **	0.32 *	0.11	-0.01	-0.08	0.71 **	0.55 **	0.49 **

* 相关性达到显著水平 $p < 0.05$ Correlation is significant at the 0.05 level; ** 相关性达到极显著水平 $p < 0.01$ Correlation is significant at the 0.01 level

将土壤呼吸速率和主要环境因子(空气温度、总辐射、0~10cm土壤含水量、10~20cm土壤含水量、20~30cm土壤含水量、5cm表层土壤温度)进行多元逐步回归分析,得到如下方程: $R = 0.011W_1 - 0.005W_2 + 6.117 \times 10^{-5}D + 0.038$, $r^2 = 0.72$, $p < 0.001$,式中, R 为土壤呼吸速率($\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), W_1 为0~10cm土壤含水量(体积比), W_2 为10~20cm土壤含水量, D 为总辐射(W/m^2)。该方程可解释土壤呼吸作用生长季变化的72%,即克氏针茅草原生长季72%的土壤呼吸变化是由土壤含水量和总辐射共同决定的,其中土壤水分(0~10cm)是影响克氏针茅草原土壤呼吸生长季变化的主导环境因子,可单独解释土壤呼吸作用变异的51%。

3 讨论

3.1 典型草原主要类型土壤呼吸动态比较

克氏针茅草原和羊草草原、大针茅草原同属于温带典型草原。大针茅草原^[13]和羊草草原^[14~16]土壤呼吸作用日动态都表现为单峰型曲线。大针茅草原土壤呼吸速率高峰值出现在13:00~17:00,最小值出现在2:00~4:00^[13]。不同物候期羊草草原的高峰值出现在13:00~14:00左右,在23:00~24:00达到最小值^[16]。克氏针茅草原与这两种类型草原相比,土壤呼吸速率峰值的出现时间提前,最小值的出现时间与大针茅群落草原类似,但比羊草草原延迟。

在整个生长季的尺度上,大针茅草原土壤呼吸的季节动态近似为一个梯形曲线,从7月中旬到8月末维

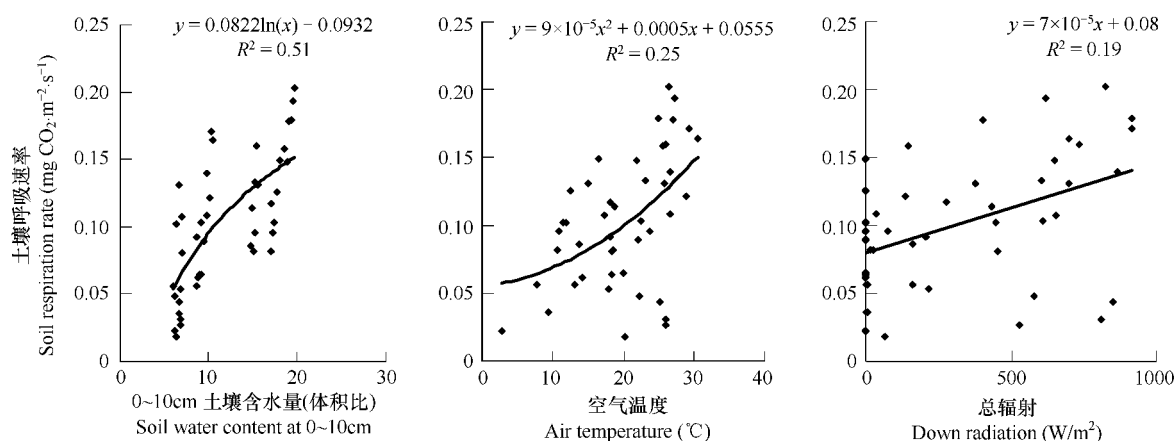


图3 土壤呼吸速率与0~10cm土壤含水量、空气温度以及总辐射的相关关系

Fig. 3 Relationships between soil respiration rates and environmental factors (soil water content at 0~10cm, air temperature, total radiation)

持在一个较高的水平,8月末达到峰值,但这种梯形曲线被认为是峰值期延时了的单峰曲线,与观测频率有关^[17,18]。羊草草原土壤呼吸速率的季节动态也为单峰型曲线,最大值出现在7月下旬^[19]。刘立新^[20]等比较研究了位于锡林河流域的羊草退化草原、羊草自由放牧草原、大针茅自由放牧草原土壤呼吸速率生长季动态,发现其变化规律均呈明显的单峰曲线,最大峰值出现在7月下旬,最小值出现在9月份。而本研究中克氏针茅草原的土壤呼吸速率的峰值出现在6月份,比大针茅草原和羊草草原提前,最小值也提前出现在8月份。董云社^[10]等比较分析了贝加尔针茅草原、羊草草原、大针茅草原和克氏针茅草原土壤呼吸季节动态,指出7~8月份各水热因子均达到较适宜的水平,植物进入生长盛期,根系生长和土壤微生物的活动也随之增强,土壤呼吸通量达到最高;8月下旬以后,随着气温和地温的逐渐降低,土壤根系和微生物的活动减弱,土壤呼吸通量也随之降低。陈全胜等^[21]研究发现,在典型草原退化群落,土壤呼吸的最高值出现在水热条件最好的6月底。在本研究中,6月份是克氏针茅草原2005年生长季水热条件最适宜的时期,而在8月份高温和干旱抑制了土壤呼吸,所以峰值和最小值分别提前出现在6月份和8月份。因此,在典型草原,水热条件的变化是导致土壤呼吸峰值出现时间发生变化的重要原因。

3.2 典型草原主要类型土壤呼吸作用环境控制因子分析

在大针茅草原,崔骁勇等^[18]认为10~20cm土层的含水量可以解释土壤呼吸变异的80%。刘立新等^[20]分别在羊草退化草原、羊草自由放牧草原和大针茅自由放牧草原同时进行土壤呼吸观测研究,发现表层土壤含水量(0~10cm)可以解释土壤呼吸变异的80.5%~89.0%,并认为研究区域地处半干旱区域,土壤水分多处于较低的水平,加之在观测期间(2005年生长季)气候较往年干旱,因此土壤呼吸受到土壤水分条件的强烈制约,使得呼吸速率与其它因子的相关性由于过分干旱的气候而被土壤水分所掩盖。董云社等^[10]认为生长季内土壤表层(0~10cm, 10~20cm)含水量的变化通常能解释克氏针茅草原土壤呼吸速率变异的90%以上。还有一些研究认为在典型草原区,温度和水分共同影响着土壤呼吸作用。李凌浩等^[19]认为羊草草原70%的土壤呼吸量变化是由气温和土壤含水量共同决定的,其中气温的单独贡献率为58%。贾丙瑞等^[15]也认为在羊草草原气温和表层土壤含水量(0~10cm)共同影响着土壤呼吸作用,但是温度的影响次于土壤含水量。在典型草原退化群落,气温和10~20cm土壤含水量(质量比)可以解释土壤呼吸86%的变化状况^[21]。Qi等^[11]对克氏针茅草原进行了连续3年的观测研究,发现土壤含水量(10~20cm)是影响土壤呼吸变异的主要环境因子。本研究结果表明在克氏针茅草原约有72%的土壤呼吸生长季变异是由土壤含水量(0~10cm、10~20cm)和总辐射共同决定的,其中土壤含水量是影响克氏针茅草原土壤呼吸生长季变化的主导环境因子。

基于对克氏针茅草原日、生长季尺度上的土壤呼吸主导影响因子的分析发现,不同时间尺度上土壤呼吸的主导因素存在差异。在整个生长季,控制土壤呼吸的主要因子是土壤水分和总辐射,其中土壤水分(0~

10cm)可单独解释土壤呼吸变异的51%。而在日的尺度上,随着生长期的变化,主要控制因子也发生变化;在生长季初期和末期的主导控制因子是总辐射;而在生长季中期,水分和温度则成为主导因素。已往的典型草原土壤呼吸研究中,多集中于在单一时间尺度下探讨影响土壤呼吸的环境因子,很少有研究同时关注不同时间尺度下以及同一时间尺度但在不同生长阶段土壤呼吸控制因子的差异。这在很大程度上限制了土壤呼吸速率模拟的准确性。

4 结论

(1)克氏针茅草原土壤呼吸作用日动态表现为单峰曲线变化,土壤呼吸速率峰值出现在10:00~13:00,最小值出现在凌晨4:00左右。生长季动态也呈现单峰型曲线变化,观测期间日均最大值($0.14\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)出现在6月份,日均最小值($0.03\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)出现在8月份。其变化动态与典型草原的其它类型羊草草原和大针茅草原的变化趋势一致。

(2)不同时间尺度上,控制克氏针茅草原土壤呼吸速率的环境因子是不同的。在日的时间尺度上,生长初期和末期主导控制因子是总辐射。而在生长中期水分和温度成为主导因素。从整个生长季看,控制土壤呼吸的主要因子是土壤水分和总辐射,其中土壤水分可单独解释土壤呼吸变异的51%。

(3)确认不同时间尺度影响土壤呼吸的主导因素,对于提高土壤呼吸模型的模拟精度具有十分重要的意义。

References:

- [1] Li L H, Chen Z Z. Soil respiration in grassland communities in the world. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 45–51.
- [2] Liu X Z, Wan S Q, Su B, *et al.* Response of soil CO_2 efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant And Soil*, 2002, 240: 213–223.
- [3] Wan S Q, Norby R J, Ledford J, *et al.* Responses of soil respiration to elevated CO_2 , air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 2007, 13:2411–2424.
- [4] Byrne K A, Kiely G. Partitioning of respiration in an intensively managed grassland. *Plant And Soil*, 2006, 282: 281–289.
- [5] Wang W, Ohse K J, Liu J J, *et al.* Contribution of root respiration to soil respiration in a C3/C4 mixed grassland. *Journal of Biosciences*, 2005, 30: 507–514.
- [6] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53–69.
- [7] Bahn M, Knapp M, Garajova Z, *et al.* Root respiration in temperate mountain grasslands differing in land use. *Global Change Biology*, 2006, 12: 995–1006.
- [8] Wang W, Guo J X. Contribution of CO_2 emission from soil respiration and from litter decomposition in *Leymus chinensis* in northeast Songnen Grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 655–660.
- [9] Wang W, Guo J X, Feng J, *et al.* Contribution of root respiration to total soil respiration in a *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. Grassland of northeast China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48 (4): 409–414.
- [10] Dong Y S, Qi Y C, Liu J Y, *et al.* Variation characteristics of soil respiration flux of 4 communities in the grassland under different precipitation intensity. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(5): 473–479.
- [11] Qi Y C, Dong Y S, Domroes M, *et al.* Comparison of CO_2 effluxes and their driving factors between two temperate steppes in Inner Mongolia, China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(5): 726–736.
- [12] Liu L X, Dong Y S, Qi Y C, *et al.* Study on the temperature sensitivity of soil respiration in Xilin river of Inner Mongolia, China. *China Environmental Science*, 2007, 27(2): 226–230.
- [13] Cui X Y, Wang Y F, Du Z C. Primary study on soil respiration of main plant communities in typical grasslands in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 1999, 7(3): 245–250.
- [14] Jia B R, Zhou G S, Yuan W P. Modeling and coupling of soil respiration and soil water content in fenced *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Ecological Modeling*, 2007, 201(2): 157–162.
- [15] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* Soil respiration and its influencing factors at grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Nei Mongolia. *Environmental Science*, 2005, 26(6): 1–7.

- [16] Qi Y C, Dong Y S, Liu J Y, *et al.* Characteristics of the daily dynamic of CO₂ emission flux in the semi-arid steppe in Inner Mongolia and influence of environmental factors. *Science in China, Ser. D, Earth Science*, 2005, 35(6): 493—501.
- [17] Chen S Q, Cui X Y, Zhou G S, *et al.* Study on the CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition in *Stipa grandis* steppe in Xilin river basin, Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(6): 645—650.
- [18] Cui X Y, Chen S Q, Chen Z Z. CO₂ release from typical *Stipa Grandis* grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 390—394.
- [19] Li L H, Wang Q B, Bai Y F, *et al.* Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin river basin as affected by over-grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(6): 680—686.
- [20] Liu L X, Dong Y S, Qi Y C. Study on the free-grazed steppes root respiration of growing season in the Xilin River Basin. *Environmental Science*, 2006, 27(12): 2376—2381.
- [21] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xinlin river basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 202—209.
- [22] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 831—836.
- [23] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Responses of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingol grassland, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 441—447.
- [24] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 653—660.
- [25] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* A comparative study on soil respiration between grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1611—1615.
- [26] Li L H, Han X G, Wang Q B, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland and in the Xinlin river basin. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(1): 29—32.
- [27] Li L H, Li X, Bai W M, *et al.* Soil carbon budget of a grazed *Leymus Chinensis* steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 312—317.
- [28] Liu L X, Dong Y S, Qi Y C, *et al.* Study of distinguish root respiration from total soil respiration by root exclusion method in the temperate semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 689—694.
- [29] Qi Y C, Dong Y S, Yang X H, Geng Y B, *et al.* Effects of grazing on carbon dioxide and methane fluxes in typical temperate grassland in Inner Mongolia, China. *Resources Science*, 2005, 27(2): 103—109.
- [30] Wang F Y, Zhou G S, Jia B R, *et al.* Effects of heat and water factors on soil respiration of restoring *Leymus chinensis* steppe in degraded land. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(5): 644—649.
- [31] Cao G M, Li Y N, Zhang J X, *et al.* Values of carbon dioxide emission from different land-use patterns of Alpine meadow. *Environmental Science*, 2001, 22(6): 14—19.
- [32] Zhang D Q, Shi P L, He Y T, *et al.* Quantification of soil heterotrophic respiration in the growth period of alpine steppe-meadow on the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 458—464.
- [33] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81—99.
- [34] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23: 199—209.
- [35] Chen Z Z. Preface. In: Chen Z Z, Wang S P eds. *The Ecosystem of Typical Steppe in China*. Beijing: Science Press, 2000. 1—2.
- [36] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71—90.
- [37] Xu Z Q, Min Q W, Wang Y S, *et al.* Impact of human disturbance on soil nutrient contents of typical grasslands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 38—42.
- [38] Yao D L, Zhang Q, Shen Z X, *et al.* Study and Survey of the Microclimate of Alpine Meadows. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(4): 301—305.

参考文献:

- [1] 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸. *生态学杂志*, 1998, 17(4): 41—45.
- [8] 王娟, 郭继勋. 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放 CO₂ 贡献量. *生态学报*, 2002, 22(5): 655—660.
- [10] 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. *科学通讯*, 2005, 50(5): 473—479.
- [12] 刘立新, 董云社, 齐玉春, 等. 内蒙古锡林河流域土壤呼吸的温度敏感性. *中国环境科学*, 2007, 27(2): 226—230.
- [13] 崔晓勇, 王艳芬, 杜占池. 内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸的初步研究. *草地学报*, 1999, 7(3): 245—250.

- [15] 贾丙瑞,周广胜,王风玉,等. 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.
- [16] 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. 中国科学,D 辑,地球科学,2005,35(6):493~501.
- [17] 陈四清,崔晓勇,周广胜,等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究. 植物学报,1999,41(6):645~650.
- [18] 崔晓勇,陈四清,陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究. 应用生态学报,2000,11(3):390~394.
- [19] 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. 植物生态学报,2000,24(6):680~686.
- [20] 刘立新,董云社,齐玉春. 锡林河流域生长季不同草地类型根系呼吸特征研究. 环境科学,2006,27(12):2376~2381.
- [21] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响. 植物生态学报,2003,27(2):202~209.
- [22] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 典型温带草原群落土壤呼吸温带敏感性 with 土壤水分的关系. 生态学报,2004,24(4):831~836.
- [23] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应. 植物生态学报,2003,27(4):441~447.
- [25] 贾丙瑞,周广胜,王风玉,等. 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.
- [26] 李凌浩,韩兴国,王其兵,等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计. 植物生态学报,2004,26(1):29~32.
- [27] 李凌浩,李鑫,白文明,等. 锡林河流域一个放牧羊草群落中碳素平衡的初步估计. 植物生态学报,2004,28(3):312~317.
- [28] 刘立新,董云社,齐玉春,等. 应用根去除法对内蒙古温带半干旱草原根系呼吸与土壤总呼吸的区分研究. 环境科学,2007,28(4):689~694.
- [29] 齐玉春,董云社,杨小红,等. 放牧对温带典型草原含碳温室气体 CO₂、CH₄ 通量特征的影响. 资源科学,2005,27(2):103~109.
- [30] 王风玉,周广胜,贾丙瑞,等. 水热因子对退化草原羊草恢复演替群落土壤呼吸的影响. 植物生态学报,2003,27(5):644~649.
- [31] 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. 环境科学,2001,22(6):14~19.
- [32] 张东秋,石培礼,何永涛,等. 西藏高原草原化小嵩草草甸生长季土壤微生物呼吸测定. 自然资源学报,2006,21(3):458~464.
- [33] 陈佐忠. 绪论. 见:陈佐忠,汪诗平,等主编. 中国典型草原生态系统. 北京:科学出版社,2000. 1.
- [37] 许中旗,闵庆文,王英舜,等. 认为干扰对典型草原生态系统土壤养分状况的影响. 水土保持学报,2006,20(5):38~42.
- [38] 姚德良,张强,沈振西,等. 高寒草甸小气候考察研究. 草地学报,2003,11(4):301~305.