

# 库布齐沙漠油蒿灌丛土壤呼吸速率时空变异特征研究

孟祥利<sup>1,2</sup>, 陈世苹<sup>1</sup>, 魏龙<sup>1,2</sup>, 林光辉<sup>1\*</sup>

(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 100049)

**摘要:**利用 Li-840 红外气体分析仪和 Li-6400-09 土壤呼吸气室组装而成的动态密闭土壤呼吸测定系统, 于 2006 年生长季对内蒙古库布齐沙漠油蒿 (*Artemisia ordosica*) 生态系统 2 种不同类型土壤的土壤呼吸速率进行了野外测定, 分析了日动态、季节动态及其对环境因子的响应, 并阐述了油蒿灌丛从空间异质性的特征. 结果表明, 油蒿灌丛的土壤呼吸速率日动态呈单峰曲线, 在 12:00 左右有最大值. 在适宜的水分和温度条件下, 生长季里土壤呼吸速率在 7~8 月份出现最大值. 土壤呼吸速率的季节动态与土壤含水量有显著的相关关系, 表明水分是限制生长季干旱区灌丛土壤呼吸的最重要因子, 分别可以解释油蒿冠幅下土壤和裸地的土壤呼吸速率 2006 年主要生长季节 (5~9 月) 变化的 75% 和 77%. 油蒿灌丛土壤呼吸速率在空间尺度上存在着显著的异质性. 油蒿冠幅覆盖下的土壤呼吸速率季节平均值为  $(155.58 \pm 15.20) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 要显著地大于灌丛间裸地的数值  $(110.50 \pm 6.77) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 2 种不同类型土壤的土壤呼吸速率是由于根生物量的差异引起的, 根生物量可以解释 2006 年生长季库布齐沙漠油蒿灌丛土壤呼吸速率空间异质性的 43%. 结果表明, 在植被覆盖度异质性较大的灌丛生态系统中, 要准确定量生态系统碳的释放时, 必须充分考虑小尺度上土壤呼吸的空间异质性.

**关键词:** 土壤呼吸速率; 土壤含水量; 根生物量; 时间变化; 空间差异; 沙漠

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1152-07

## Temporal and Spatial Variations of Soil Respiration in an *Artemisia ordosica* Shrubland Ecosystem in Kubuqi Desert

MENG Xiang-li<sup>1,2</sup>, CHEN Shi-ping<sup>1</sup>, WEI Long<sup>1,2</sup>, LIN Guang-hui<sup>1</sup>

(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 100049, China)

**Abstract:** Based on the dynamic measurements of soil respiration using a closed dynamic chamber and its related environmental factors in a desert shrubland ecosystem regularly during the growing season (May–September) of 2006, we studied the diurnal and seasonal variations of soil respiration of two different land cover soils and their responses to soil temperature, soil water content and biotic factors. The objective was to evaluate the temporal and spatial patterns of soil respiration and their responsible factors in *Artemisia ordosica* shrubland in Kubuqi Desert, Inner Mongolia, China. The diurnal variation of soil respiration showed an asymmetric single-peak pattern, with the peak value occurring around 12:00. Soil respiration fluctuated greatly during the growing season, reaching peak values in July–August. There was a significant linear relationship between soil respiration rate and soil water content at 10 cm depth. Most of the seasonal variation in soil respiration (75%–77%) could be explained by the variation in soil water content. The mean soil respiration under the shrub canopy was  $(155.58 \pm 15.20) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , which was significantly higher than that for the bare ground between the shrubs  $(110.50 \pm 6.77) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . The sensitivity of soil respiration to soil water content was also significantly higher for the soils under the canopy than for the bare ground soils. The spatial variation of soil respiration was caused mainly by the root biomass, which can be explained about 43% of heterogeneity. The results suggest that variation on a small time and space scales must be taken into consideration when estimating soil  $\text{CO}_2$  efflux in the desert ecosystems.

**Key words:** soil respiration; soil water content; root biomass; temporal variation; spatial variation; desert

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 从全球来讲约占到了每年生物圈向大气释放  $\text{CO}_2$  的 20%~38%<sup>[1,2]</sup>. 因此, 土壤呼吸的微小变化都可能引起大气  $\text{CO}_2$  浓度的明显改变, 从而进一步加剧气候变化<sup>[3]</sup>. 像许多其他的土壤过程一样, 土壤呼吸速率在很大的空间尺度和不同的时间尺度上存在着异质性<sup>[4~9]</sup>. 这种异质性可能是由于不同的影响因子造成的, 如土壤温度<sup>[10]</sup>、土壤含水量<sup>[11]</sup>、降雨<sup>[12]</sup>、植被类型<sup>[13]</sup>、地形<sup>[14]</sup>、土壤碳和氮的含

量<sup>[15]</sup>、土壤结构<sup>[16]</sup>等. 评估不同时间尺度和空间尺度上的土壤呼吸速率并研究在不同生态系统中土壤呼吸与环境因子的关系, 将有助于更深刻地理解全球陆地生态系统碳循环.

收稿日期: 2008-04-08; 修订日期: 2008-05-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KSCX2-SW-127); 国家自然科学基金项目 (90511001, 30521002)

作者简介: 孟祥利 (1981~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统生态学、稳定性同位素生态学, E-mail: xlmeng04@yahoo.com.cn

\* 通讯联系人, E-mail: ghlin@ibcas.ac.cn

国内关于草原土壤呼吸作用的研究已有很多报道,但主要是集中在内蒙古、松嫩平原和青藏高原等典型的温带草原,而对沙漠灌丛生态系统土壤呼吸的研究较少<sup>[17]</sup>.库布齐沙漠所处的鄂尔多斯高原是中国北部干旱区一个相对独立的地理单元,位于一个复杂和敏感的群落交错区<sup>[18]</sup>.这里的原生植被一般为沙生灌丛.虽然群落里灌丛占优势是草原退化和沙漠化的一个指示,但是灌丛对阻滞沙化和促进沙漠里植物生长却具有重要作用<sup>[19]</sup>.本试验以鄂尔多斯高原库布齐沙漠中油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛生态系统为研究对象,分析了2种不同土壤类型(灌丛冠幅覆盖下的土壤和裸地)在2006年主要生长季里(5~9月)的土壤呼吸速率季节变化,以及在生长旺季的土壤呼吸日变化,同时研究了2种不同土壤类型的土壤呼吸与土壤含水量、土壤温度、根生物量等之间的关系,并探讨了油蒿灌丛土壤呼吸速率的空间异质性,以期为进一步认识我国荒漠生态系统的碳循环过程提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域自然概况

库布齐沙漠地处鄂尔多斯高原北部与河套平原的交接地带,呈东西带状分布,本研究区(44° 22' 51" N, 108° 32' 55" E, 海拔1 160 m)位于库布齐沙漠南端的固定沙地上,在行政区划上属于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗.研究区所属的杭锦旗地处温带干旱草原、荒漠草原过渡带,属半干旱大陆性季风气候区,主要特点是:干旱风大,降水较少,冬季寒冷而漫长,夏季炎热而短促.据杭锦旗气象站1970~2003年观测记录,全年平均日照时数为3 157 h,年平均气温6.3℃,年平均降水量277 mm,年平均蒸发量2 487 mm,为全年平均降水量的8.97倍.湿度低,年平均绝对湿度5.74 mb,年平均相对湿度47.87%.研究区地带性土壤为棕钙土,非地带性土壤以风沙土为主.地貌以平缓起伏的固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘和丘间低地相间分布为特征,为广阔的沙地景观.在一些固定和半固定沙丘,油蒿灌丛形成单优种植物群落.本研究区的建群种为油蒿(*Artemisia ordosica*),并明显的呈斑块状分布,零星分布有伴生植物如沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和虫实(*Corispermum mongolicum*)等.

### 1.2 土壤呼吸速率的测定

土壤呼吸速率采用闭路CO<sub>2</sub>测定系统进行测定.测定仪器由一个红外CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪(Li-840,

Licor Inc., Lincoln, NE)、一个空气泵、一台笔记本电脑、一个12 V的蓄电池和一个Li-6400-09土壤呼吸气室组装而成.为了减少对土壤表层的干扰,土壤呼吸室放置在由PVC管制作的土壤环上,土壤环插入土壤2 cm,在第1次土壤测定的前1 d安置,直至最后一次测定后取出.考虑生态系统土壤的空间差异,本研究选择了地表覆盖不同的2种土壤类型:一种为灌丛冠幅之间的裸地,另一种为油蒿灌丛冠幅覆盖下的土壤.每种地表覆盖类型土壤采用分层随机取样的方法设置9个重复,布置土壤环.

测量时土壤呼吸室需要尽量接近土壤表面,以使土壤呼吸室内的气流能够充分与表面的气体混合.每次测定持续时间为2 min,密闭气室中的温度、湿度和CO<sub>2</sub>浓度每2 s记录1次.土壤呼吸的速率通过测定时CO<sub>2</sub>浓度的变化计算得到.每个土壤呼吸数值的计算,首先要计算C'值.  $C' = C/[1 - (W/1000)]$ ,式中,C指CO<sub>2</sub>的摩尔分数(mmol·mol<sup>-1</sup>),W指H<sub>2</sub>O的摩尔分数(mmol·mol<sup>-1</sup>).然后通过下列方程计算土壤呼吸速率<sup>[20]</sup>:

$$F_c = V P_{av} (1000 - W_{av}) (dC'/dt) / [R S (T_{av} + 273)]$$

式中, $F_c$ 指土壤呼吸速率[μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>],V是气室的体积(m<sup>3</sup>), $P_{av}$ 是气室内的平均气压(kPa), $W_{av}$ 是水汽平均摩尔浓度(mmol·mol<sup>-1</sup>),R是理想气体常数[8.314 J·(mol·K)<sup>-1</sup>],S是气室的表面积(m<sup>2</sup>), $T_{av}$ 是测定时的平均温度(℃), $dC'/dt$ 是C'变化回归斜率.测定的土壤呼吸速率值均将单位换算为mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,以便与大部分已经发表的文献相比较.

野外实验从5月底到9月中旬,每隔约10 d进行1次土壤呼吸速率的测定,前后共10次.大部分的测定都是在09:00~10:30之间完成的,因为在这一时间段测得的土壤呼吸基本可以代表日平均通量<sup>[21]</sup>.为了避免日变化带来的误差,每1 d的测定尽量在足够短的时间内完成(少于1 h).

为分析库布齐沙漠油蒿灌丛生态系统中,2种不同地表覆盖类型的土壤呼吸速率在1 d尺度上变化的差异,在2006年油蒿的生长旺季里的7月25日,测定了1次2种地表覆盖类型土壤08:00~24:00的土壤呼吸速率日动态,每隔2 h测定1次.

### 1.3 土壤温度和土壤含水量测定

在土壤呼吸速率测定的同时,土环附近0~10 cm的土壤温度用1个精度为0.1℃、长10 cm的数

字土壤温度计测定.土壤水分采用铝盒烘干法测定,每次取部分 0~10 cm 的土壤放入铝盒,在实验室用烘箱在 105℃持续烘干至恒重进行测定.

1.4 根生物量、土壤碳氮含量

最后一次测定完成之后,在每个土环所在的位置用 1 个长 15 cm、直径为 10 cm 的根钻取 1 个土核带回实验室.将其中的根挑出,60℃烘干至恒重后称重,测定根生物量.将剔除根系后的部分土壤风干,粉碎后过 0.25 mm 筛,用元素分析仪(PE-2400 II, USA)测定土壤有机碳和有机氮含量.然后计算得到土壤有机质含量(SOM)(土壤碳含量乘以常数 1.724).

1.5 统计方法

土壤呼吸速率在 2 种测定位置(裸地和冠幅覆盖下的土壤)的差异采用配对样本的 *T* 检验;运用相关分析方法分析水热因子、土壤理化特性、根生物量及其测定位置与土壤呼吸作用的关系;用线性回归方法分析土壤呼吸作用速率与根系生物量之间的关系.所有的数据分析基于统计分析软件 SPSS 13.0 (SPSS, Chicago, IL, USA)完成.表格和图表分别用 Excel (Microsoft Corp., 2003) 和 Sigmaplot 10.0(Systat software Inc. 2006)软件制作.

2 结果与分析

2.1 2 种类型土壤的土壤呼吸速率日变化

库布齐沙漠油蒿灌丛 2 种不同类型土壤的土壤

呼吸速率在生长旺季(7 月 25 日)的日变化如图 1 所示.从中可以看出,油蒿生态系统中冠幅下的土壤呼吸速率和裸地土壤呼吸速率在油蒿生长旺季有着相同的日变化趋势,均呈单峰曲线并在 12:00 左右有最大值,然后迅速降低,在 22:00~24:00 有最小值.土壤温度的最大值出现在 14:00~16:00,比土壤呼吸速率峰值的出现滞后 4 h 左右.2 种不同的地表覆盖类型土壤的土壤呼吸速率的大小存在着明显的差异.1 d 中灌丛冠幅下的土壤呼吸速率是裸地土壤呼吸速率的 1.6~3.0 倍,它们的最大值分别为(520.60 ± 54.63) mg•(m<sup>2</sup>•h)<sup>-1</sup> 和 (288.79 ± 35.39) mg•(m<sup>2</sup>•h)<sup>-1</sup>.

2.2 土壤呼吸速率、土壤温度和土壤含水量的季

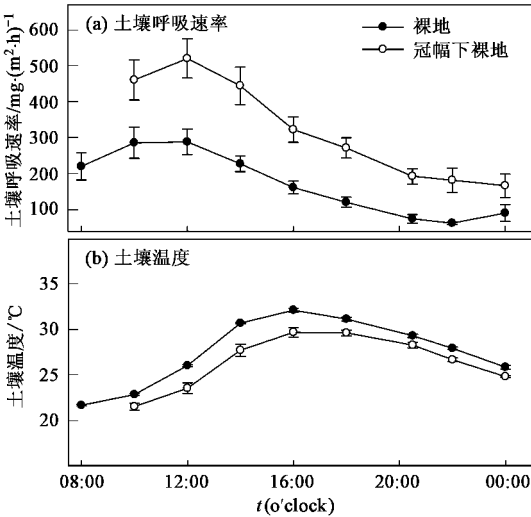


图 1 油蒿灌丛生态系统裸地和冠幅下土壤的土壤呼吸速率和土壤温度日动态

Fig.1 Diurnal patterns of soil respiration rate and soil temperature of bare ground between shrubs and soil under the canopy of shrubs in the *A. ordosica* shrubland ecosystem

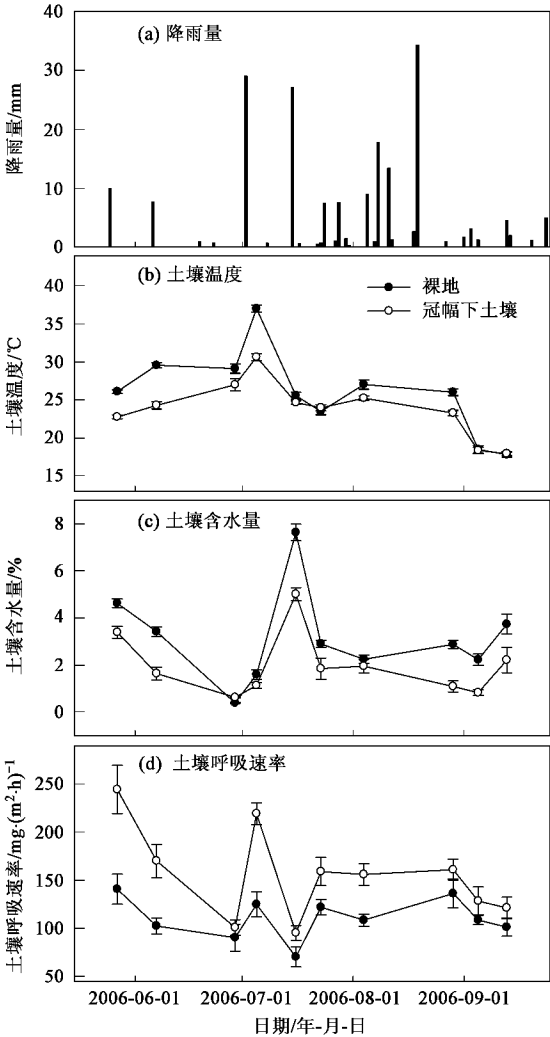


图 2 2006 年生长季内油蒿灌丛生态系统降雨量、土壤温度、土壤含水量和土壤呼吸速率的季节动态 (Means + SD, n = 9)

Fig.2 Seasonal dynamics of rainfall, soil temperature, soil moisture content and soil respiration rate during the growing season of 2006 in the *A. ordosica* shrubland ecosystem (Means + SD, n = 9)

节变化

在整个生长季,土壤呼吸速率存在着明显的季节变化.除去一些在雨后测定的数值,土壤呼吸速率在晚春处于一个较低水平,然后逐渐变大,直到7月和8月达到较高的值,最后在9月初开始降低.除了在7月中旬每种覆盖类型土壤的土壤呼吸速率都出现一个异常的低值之外,土壤呼吸速率的波动与土壤含水量的变化很吻合.2种不同地表覆盖类型土壤的土壤呼吸速率也存在着显著的差异,在生长季中,冠幅下的土壤的土壤呼吸速率均值为 $(155.58 \pm 15.20) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,在 $(95.24 \pm 7.72) \sim (244.50 \pm 25.11) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 波动;而裸地的土壤呼吸速率季节变化较小,均值为 $(110.50 \pm 6.77) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,在 $(70.12 \pm 10.38) \sim (140.81 \pm 15.68) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 波动.它们之间的差异在降雨之后表现的更为明显,但是随着土壤含水量的降低而减弱(图2和表1).

2.3 土壤温度和土壤含水量对土壤呼吸速率的影响

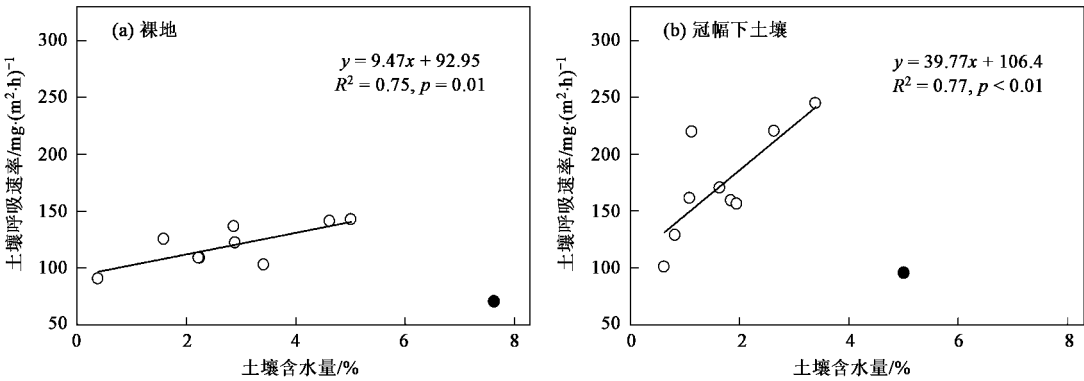
在本研究中,通过线性逐步回归的方法对土壤温度和土壤含水量对土壤呼吸速率的影响进行分

表 1 油蒿灌丛间裸地与油蒿冠幅下土壤的土壤呼吸速率、土壤温度、土壤含水量和其他土壤性质之间的比较<sup>1)</sup>(Means + SD, n = 9)  
Table 1 Comparisons in the seasonal mean of soil respiration rate, soil temperature, soil water content and other soil characteristics between the bare ground and the soil under the canopy(Means ± SD, n = 9)

| 项目                                                                | 裸地                     | 冠幅下土壤              |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|
| 季节平均土壤呼吸速率/<br>$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ | $110.50 \pm 6.77^{**}$ | $155.58 \pm 15.20$ |
| 土壤温度/℃                                                            | $24.0 \pm 1.8^*$       | $23.7 \pm 1.2$     |
| 土壤含水量/%                                                           | $3.29 \pm 0.65^{**}$   | $2.02 \pm 0.43$    |
| 根生物量/ $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$                            | $0.071 \pm 0.027^{**}$ | $0.39 \pm 0.091$   |
| 土壤有机质含量/%                                                         | $0.17 \pm 0.01^{**}$   | $0.27 \pm 0.02$    |
| 土壤氮含量/%                                                           | $0.026 \pm 0.002^*$    | $0.046 \pm 0.008$  |
| 土壤碳氮比                                                             | $3.82 \pm 0.37$        | $3.99 \pm 0.25$    |

1) \*\* 相关性达到极显著水平  $p < 0.01$ , \* 相关性达到显著水平  $p < 0.05$ ,下同

析.结果表明在油蒿生态系统的主要生长季里,相比土壤温度,土壤呼吸速率更明显地受到土壤含水量影响.笔者发现,如果忽略了7月的异常低值,0~10 cm的土壤含水量的变化可以解释2种不同土壤覆盖类型土壤在整个生长季土壤呼吸速率季节变化的75%和77% ( $p < 0.05$ )(图3).土壤呼吸速率和土壤含水量存在着显著的线性回归关系( $p < 0.05$ ).



图中黑点代表7月中旬一场27.1 mm降雨后的异常低值,不参与回归分析

图3 土壤呼吸速率与土壤含水量的关系

Fig.3 Relationship between soil respiration rate and soil water content

2.4 土壤呼吸速率的空间差异

通过表1也可看出,2种不同地表覆盖类型的土壤存在着显著的空间差异.冠幅下土壤的根生物量、土壤有机质含量和土壤氮含量都显著的大于裸地(但土壤碳氮比差异不显著).9月13日最后一次常规测定中所有点的土壤呼吸速率与环境生物因子(包括根生物量、土壤有机质含量、土壤氮含量、土壤碳氮比、土壤温度以及土壤含水量)的相关分析结果

如表2所示.可以看到,在1个测定日内,油蒿灌丛生态系统土壤呼吸速率与根生物量之间有显著的相关关系,而与其他几个因子相关关系不显著.这说明在小尺度区域上,土壤呼吸速率的差异性主要是由于土壤环中植物地下部分生物量的差异性引起的.利用 Stepwise 方法对土壤呼吸速率与各环境生物因子的回归分析,可以得到拟合模型如表3所示.根系生物量解释了土壤呼吸速率空间变异性的43%.

表 2 油蒿灌丛各点土壤呼吸速率与土壤因子的相关分析结果

| Table 2 Correlations of several soil characteristics with soil respiration rate in the <i>Artemisia ordosica</i> shrubland |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 根生物量                                                                                                                       | 土壤有机质 | 土壤 N  | C:N 比 | 土壤含水量 | 土壤温度  |
| 0.65**                                                                                                                     | 0.44  | -0.48 | 0.32  | 0.20  | -0.86 |

表 3 油蒿灌丛各点土壤呼吸速率与土壤因子的逐步回归结果<sup>1)</sup>

| Table 3 Results from the stepwise regression between soil respiration rate and several soil characteristics in the <i>Artemisia ordosica</i> shrubland |      |       |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|----------------|
| 模型                                                                                                                                                     | F    | a     | R <sup>2</sup> |
| $y = 71.28x + 82.39$                                                                                                                                   | 11.9 | 0.003 | 0.43           |

1) x 是根生物量(mg·cm<sup>-3</sup>); y 是土壤呼吸速率[mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]

3 讨论

本研究的结果表明,在库布齐沙漠油蒿灌丛的生长旺季(7 月 25 日),2 种不同类型土壤的土壤呼吸和土壤温度的日变化都表现出相似的单峰曲线,并且土壤呼吸和土壤温度的日变化存在时滞现象,这与其它一些在草原或荒漠生态系统的研究类似<sup>[22~24]</sup>.同为 2006 年对鄂尔多斯油蒿灌丛土壤呼吸的研究,Jin 等<sup>[17]</sup>也发现在营养生长期(6 月 21 日)和生殖生长期(8 月 29 日)2 个时期土壤呼吸的日变化都为单峰曲线,并在 13:00 左右有最大值,与本研究结果类似.土壤呼吸是一个十分复杂的土壤生态学过程,主要包括土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸和植物根系的呼吸 3 个组分.影响这些组分的主导环境因子有时并不相同,而任何一个呼吸过程的改变都会使总土壤呼吸速率发生变化.温度条件在一定程度上是影响总土壤呼吸速率的主要因子,但不是唯一的控制因子.本实验测定的油蒿灌丛从生长旺季 2 种不同类型土壤的土壤呼吸速率日变化与土壤温度、空气温度都没有显著的相关性;而 Jin 等<sup>[17]</sup>发现在营养生长期土壤呼吸日变化与土壤温度没有显著相关,但是在生殖生长期却相关显著.这些说明温度并不始终是影响库布齐沙漠油蒿灌丛生长季的土壤呼吸速率日变化的主要因素.另外土壤呼吸速率峰值的出现比土壤温度的峰值早 4 h 左右,这也表明除了土壤温度以外的因素,如植物生理活动可能对土壤呼吸的日变化有重要的影响.已有研究表明,除温度和水分外,植物光合作用对土壤呼吸作用也有驱动作用,并且促进根系和根际微生物活动,如 Tang 等<sup>[25]</sup>的研究表明,在美国一个 Savana 橡树草原,土壤呼吸速率与植物的光合作用速率显著相关,但是要滞后 7~12 h,这主要是光合产物从叶到根传

递所需的时间.笔者在 2005 年相同地点相同时期的第一次油蒿光合作用速率日动态的测定结果表明,油蒿光合作用速率最大值出现在 08:00 左右,而后迅速下降.而在本研究中土壤呼吸速率的峰值出现比光合作用速率滞后了约 4 h.因此,在库布齐沙漠油蒿灌丛生态系统的生长旺季,可能土壤温度和植物的光合作用共同驱动了土壤呼吸速率的日动态.另外,油蒿冠幅下土壤的土壤呼吸速率日变化幅度显著地大于裸地的土壤呼吸速率日变化幅度,大约是后者的 1.57 倍,说明库布齐沙漠油蒿灌丛的土壤呼吸速率存在着显著的空间异质性.

在本研究中,油蒿灌丛生态系统在 2006 年的主要生长季节(5~9 月)里土壤呼吸速率的变化同其他一些干旱半干旱生态系统在相同的季节测定的数值在一个可以比较的范围之内.如,本研究中的土壤呼吸速率同鄂尔多斯高原上另一个附近的油蒿灌丛生态系统在 2006 年 5~9 月的土壤呼吸速率[大约是 36.43~196.42 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]<sup>[17]</sup>,以及一个内蒙古的半干旱草原生态系统[39.6~174.24 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]<sup>[26]</sup>的数值相近.但是,要比刚果的一个 Savana 人工桉树林[126.72~459.36 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]<sup>[27]</sup>和美国一个沙漠灌丛群落[109.30~1355.9 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]<sup>[12]</sup>的土壤呼吸速率的值要低.通常来说,土壤呼吸作用季节动态主要受温度和水分 2 个环境参数的影响<sup>[6,10,11]</sup>.到目前为止,虽然有很多关于土壤呼吸速率对水热因子的响应研究<sup>[16,28,29]</sup>,但还缺乏足够的数据来确定为何土壤呼吸速率和这 2 个环境因子的关系在不同的生态系统中差异显著<sup>[5,30]</sup>.在本研究中,在季节尺度上土壤呼吸速率和土壤含水量之间显著的相关关系说明,在生长季里土壤呼吸速率显著受到土壤水分的制约,但是和土壤温度没有显著的相关关系.本研究同其他在干旱和半干旱生态系统中的研究都表明,土壤水分可以在全年或者全年的一段时间里影响土壤呼吸<sup>[20,25,31]</sup>.在库布齐沙漠,全年的大量降雨都集中在 7、8 月份.7、8 月份适宜的温度和适当的土壤水分触发了生态系统的功能,特别是植物生长和土壤微生物活动,因而导致较高的土壤呼吸速率.值得注意的,2 种类型土壤都在 7 月中旬得到了土壤呼吸速率的最低值.从图 2 可以看到出,土壤呼吸速率的数值过低可能是由于 7 月 15 日一场 27.1 mm 降雨之后土壤温度的骤然降低导致的.降雨虽然使得土壤水分含量处于一个较高的水平,但温度的骤然降低,可能抑制了植物根系和微生物的活性,进而抑

制了的土壤呼吸速率,充分说明了水热因子交互作用对土壤呼吸速率影响的复杂性.

在生长季里,油蒿冠幅下土壤的土壤呼吸速率约是裸地的土壤呼吸速率的 1.12 ~ 1.76 倍(平均 1.41 倍).通过土壤呼吸速率与土壤含水量的回归方程可以看到油蒿冠幅覆盖下的土壤呼吸速率对土壤含水量响应的敏感度也要显著的高于裸地.本研究在 9 月 13 日常规测定的雨后连续测定了 2 d 土壤呼吸速率,观察降雨对土壤呼吸速率的影响(图 4),发现无论是灌丛间的裸地还是油蒿冠幅覆盖下的土壤,土壤呼吸速率在降雨后都会有明显的增加,但是冠幅下土壤呼吸速率增加的幅度要明显的大于裸地,结果也表明了 2 种不同地表覆盖类型土壤的土壤呼吸速率湿度敏感性的差异.这些都说明油蒿灌丛生态系统的土壤呼吸速率存在着显著的空间异质性.以前的一些研究也描述了土壤呼吸速率的空间异质性,如 Fang 等<sup>[32]</sup>发现美洲蒲葵下的土壤呼吸速率显著高于空旷地上的土壤呼吸速率;Han 等<sup>[33]</sup>发现玉米农田土壤呼吸作用在株间、行间和靠近玉米的不同位置差异显著.植被覆盖、根分布、环境因子和土壤性质的异质性都可能导致土壤呼吸速率的空间变化<sup>[6,7,25,34]</sup>.特别是由于维管植物导致的土壤基质、根生物量和微生物活性的不同,在干旱生态系统的空地和有植被覆盖土壤的土壤呼吸速率之间可以有很大的不同<sup>[35]</sup>.对于中国北方的油蒿灌丛,由于“富岛效应”可以导致灌丛冠幅下和裸地间的空间异质性表现得更为明显<sup>[36]</sup>.本研究逐步回归分析结果表明:这种差异主要是由于测定点地下生物量的不同造成的.Ryan<sup>[12]</sup>的研究也说明,生物因子(根生物量和土壤有机质含量等)比非生物因子更能解释这种

土壤呼吸速率的空间差异.因此在精确估算和野外测定生态系统土壤呼吸时,为了避免发生较大的偏差,必须充分考虑小尺度上的空间异质性.小尺度空间异质性的研究将是未来土壤呼吸作用一个具有挑战性的领域<sup>[7]</sup>.

4 结论

- (1)库布齐沙漠油蒿灌丛 2 种不同类型土壤的土壤呼吸速率的日变化有着相同的趋势,都呈明显的单峰曲线并在 12:00 左右有最大值;土壤温度有类似的变化趋势,但最大值出现比土壤呼吸速率滞后 4 h 左右.冠幅下土壤的土壤呼吸速率日变化幅度显著地大于裸地,在 2006 年的生长旺季,前者大概是后者的 1.57 倍,土壤呼吸速率最大值分别是: $(520.60 \pm 54.63) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(288.79 \pm 35.39) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .
- (2)在 2006 年库布齐沙漠油蒿灌丛的主要生长季节(5~9 月),土壤呼吸速率存在着显著的季节变化,在 5 月末、6 月初处于一个较低水平,然后逐渐变大,直到 7 月和 8 月达到较高的值,最后在 9 月初开始降低.2 种不同地表覆盖类型土壤的土壤呼吸速率也存在着显著的差异,在生长季中,冠幅下的土壤的土壤呼吸速率均值为 $(155.58 \pm 15.20) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,在 $(95.24 \pm 7.72) \sim (244.50 \pm 25.11) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 波动;而裸地的土壤呼吸速率季节变化较小,均值为 $(110.50 \pm 6.77) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,在 $(70.12 \pm 10.38) \sim (140.81 \pm 15.68) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 波动.土壤呼吸速率季节动态与土壤水分含量有着显著的相关关系,土壤水分的变化分别可以解释油蒿冠幅下土壤和裸地 2006 年主要生长季节里的土壤呼吸速率季节变化的 75%和 77% ( $p < 0.05$ ).

(3)库布齐沙漠油蒿灌丛生态系统的土壤呼吸速率存在着显著的空间差异.有植被覆盖的油蒿冠幅下的土壤和裸地之间的土壤呼吸速率差异明显,逐步回归分析的结果表明,根生物量可以解释空间异质性的 43%.

致谢:感谢魏雅芬和李乐义在样品采集和处理过程中给与的支持和帮助.

参考文献:

[ 1 ] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 1992, 44: 81-99.

[ 2 ] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 9: 23-36.

[ 3 ] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil

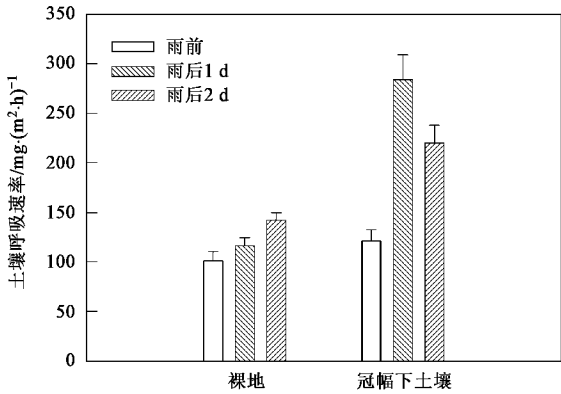


图 4 2006 年 9 月油蒿灌丛一次降雨后 2 种不同土壤类型土壤呼吸速率的变化

Fig.4 Changes in soil respiration in two types of soils after a rainfall event in September, 2006

- respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1024-1041.
- [4] Vincent G, Shahriari A R, Lucot E, *et al.* Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**: 2527-2535.
  - [5] Jia B, Zhou G, Wang Y, *et al.* Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes [J]. *Inner Mongolia Journal of Arid Environments*, 2006, **67**: 60-76.
  - [6] Tang J W, Baldocchi D D. Spatial-temporal variation of soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73** (1): 183-207.
  - [7] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**: 199-209.
  - [8] Saiz G, Green C. Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands [J]. *Plant and Soil*, 2006, **287**: 161-176.
  - [9] Li H J, Yan J X, Yue X F, *et al.* Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 90-503.
  - [10] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, **33**: 155-165.
  - [11] Liu X, Wan S, Su B, *et al.* Response of soil CO<sub>2</sub> efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2002, **240**: 213-223.
  - [12] Ryan A S. Precipitation pulses and soil CO<sub>2</sub> flux in a Sonoran Desert ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 426-436.
  - [13] Curiel J, Janssens I A, Carrara A, *et al.* Annual Q10 of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 161-169.
  - [14] Xu W H, Wan S Q. Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**: 679-687.
  - [15] Franzluebbers K, Franzluebbers A J, Jawson M D. Environmental controls on soil and whole-ecosystem respiration from a tallgrass prairie [J]. *Soil Science of America Journal*, 2002, **66**: 254-262.
  - [16] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, *et al.* Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **204**: 85-95.
  - [17] Jin Z, Qi Y C, Dong Y S. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration in desert shrubland of *Artemisia ordosica* on Ordos Plateau of Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2007, **18**(3): 231-235.
  - [18] Li X R. Study on shrub community diversity of Ordos Plateau Inner Mongolia, northern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, **47**: 271-279.
  - [19] 李新荣. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响 [J]. *中国科学(D 辑)地球科学*, 2005, **35**(4): 361-370.
  - [20] Richard L J, Stanley D S, John A A, *et al.* Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in Mojave Desert shrublands during the eighth year of exposure to elevated CO<sub>2</sub> [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 749-756.
  - [21] Du R, Lu D R, Wang G C. Diurnal, seasonal, and inter-annual variations of N<sub>2</sub>O fluxes from native semi-arid grassland soils of inner Mongolia [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**(12): 3474-3482.
  - [22] 杨晶, 黄建辉, 詹学明, 等. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸的日动态观测与测定方法比较 [J]. *植物生态学报*, 2004, **28** (3): 318-325.
  - [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] 黄湘, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河中下游怪柳群落土壤碳通量及其影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 1934-1940.
  - [25] Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1298-1304.
  - [26] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* Partitioning root and microbial biomass contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**: 653-660.
  - [27] Yann N, Daniel E, Antoine Ki, *et al.* Soil CO<sub>2</sub> effluxes, soil carbon balance, and early tree growth following savannah afforestation in Congo: Comparison of two site preparation treatments [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**: 1926-1936.
  - [28] Tang X L, Zhou G Y, Liu S G, *et al.* Dependence of soil respiration on soil temperature and soil moisture in successional forests in Southern China [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, **48** (6): 654-663.
  - [29] Fang C, Smith P, Moncrieff J B, *et al.* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature [J]. *Nature*, 2005, **433**: 57-59.
  - [30] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 1-6.
  - [31] Dong Y S, Qi Y C, Liu J Y, *et al.* Variation characteristics of soil respiration fluxes in four types of grassland communities under different precipitation intensity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**: 583-591.
  - [32] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation [J]. *Plant and Soil*, 2002, **205**: 135-146.
  - [33] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, *et al.* Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem [J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, **39**: 418-425.
  - [34] Epron D, Nouvellon Y, Rouspard O, *et al.* Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **202**: 149-160.
  - [35] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, *et al.* Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes [J]. *Ecology*, 2005, **86**: 288-297.
  - [36] Li P X, Wang Ning, He W M, *et al.* Fertile islands under *Artemisia ordosica* in inland dunes of northern China: Effects of habitats and plant developmental stages [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**: 953-963.