

水热因子对沙漠地区土壤呼吸的影响

高艳红^{1,2}, 张志山¹, 刘立超^{1,*}, 贾荣亮¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙坡头沙漠研究试验站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 利用 Li-6400-09 土壤呼吸室和 Li-6400 便携式光合测定仪, 在植物生长季对腾格里沙漠东南缘植被区和流沙区的土壤呼吸进行了连续测定, 并分析了温度和水分对土壤呼吸的影响。结果表明: (1) 植被区和流沙区土壤呼吸速率的日变化特征相似, 即夜间土壤呼吸速率保持在较低的水平, 而白天则呈现单峰变化趋势; 而季节变化趋势明显不同, 即植被区内的土壤呼吸有明显的季节变化, 流沙区则没有明显的季节变化; (2) 植被区和流沙区 0~5cm 土壤含水量与土壤呼吸速率均呈显著的线性关系, 但植被区的相关性好于流沙区。当 0~5cm 土壤含水量大于测定期间的平均值 (植被区为 6.78%、流沙区 6.94%) 时, 植被区和流沙区的土壤呼吸速率都明显高于土壤含水量小于平均值时的土壤呼吸速率, 其土壤呼吸速率平均值之比分别为: 2.6、1.5; (3) 土壤呼吸速率与地表 5cm 处土壤温度呈显著的指数关系, 当土壤含水量小于测定期间的平均值时, 植被区与流沙区的 Q_{10} 值分别为 1.23 和 1.43; 当土壤含水量大于测定期间的平均值时, 植被区与流沙区的 Q_{10} 值分别为 2.23 和 1.72。由此可见, 土壤水分不仅影响了土壤呼吸速率的大小, 而且还影响了土壤呼吸速率的温度敏感性。

关键词: 土壤呼吸; 腾格里沙漠; 温度; 水分

文章编号: 1000-0933 (2009) 11-5995-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Effects of heat and water factors on soil respiration in desert area

GAO Yan-Hong^{1,2}, ZHANG Zhi-Shan¹, LIU Li-Chao^{1,*}, JIA Rong-Liang¹

1 Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions and Environmental & Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5995 ~ 6001.

Abstract: To investigate the effects of soil temperature and soil moisture on soil respiration, we measured soil respiration rates of a revegetated area and a shifting sand area in the Tengger Desert using the Li-6400-09 soil respiration chamber technique. Results showed that: (1) soil respiration rates remained low at nighttime and exhibited a single-peak curve at daytime from April to October, and compare to the shifting sand area, a remarkable seasonal variation occurred in the revegetated area; (2) soil respiration rate was linearly correlated with volumetric soil moisture in the 0–5 cm layer, and a more significant correlation was obtained in the revegetated area than in the shifting sand area ($R^2 = 0.27$, $p < 0.01$, revegetated area; $R^2 = 0.10$, $p = 0.03$, shifting sand area). In addition, when the volumetric soil moisture was higher than its mean value during the experiment period (6.78% for revegetated area; 6.94% for shifting sand area), soil respiration rates were distinctly higher than when the volumetric soil moisture was belowed the mean value, with the ratios between them were 2.6 and 1.6 for the revegetated area and the shifting sand area, respectively; (3) an exponential model can be used to describe the relationship between soil respiration and soil temperature at depth of 5 cm. The calculated Q_{10} values were 1.23 and 1.43 when the soil moisture was lower than its mean value, and 2.23 and 1.72 when it was higher than its mean values for the revegetated area and the shifting sand area, respectively. Thus, we conclude that the soil moisture affects not only the soil respiration rates, but also the sensitivity of soil respiration to temperature in the Tengger Desert

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (40825001); 国家重点基础研究发展计划资助 (2009CB421303)

收稿日期: 2008-12-08; 修订日期: 2009-02-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lichao Liu@yahoo.com.cn

Key Words: soil respiration rate; Tengger desert; temperature; soil water moisture

土壤呼吸是土壤碳的主要输出途径和大气 CO₂ 的重要源,是全球碳循环的重要组成部分^[1~3]。据估算,每年通过土壤释放的 CO₂ 约占大气 CO₂ 的 10%^[4],它的微小变化都可能引起大气 CO₂ 浓度的明显改变^[1,5]。定量研究土壤中 CO₂ 的释放量及其与环境因子的关系,不仅对于估价生物学过程在生态系统碳收支中的作用来说非常关键^[6],而且对于在全球气候变化大背景下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^[7]。

影响土壤呼吸的环境因素很多,温度和水分能够直接或间接控制土壤呼吸速率^[8]。目前关于温度和水分对土壤呼吸的影响已有很多研究报道,但是有关水分对土壤呼吸的温度敏感性的影响依然存在争论,一些研究^[9]认为土壤含水量的增加会影响土壤呼吸的温度敏感性,但也有研究^[10]认为土壤含水量与土壤呼吸的温度敏感性之间没有显著的相关关系。

干旱、半干旱地区土地面积约占全球陆地面积的 34.4%,并且随着沙漠化的进一步扩大,干旱土地在不断增加^[11]。土壤呼吸是干旱半干旱地区土壤碳损失的主要途径之一^[12]。虽然目前对该区的土壤呼吸研究也在逐渐增加,但是相对于其他生态系统来说依然较少。目前,在中国荒漠灌木群落进行的一些研究,在一定程度上解释了荒漠地区土壤呼吸与环境因子的关系^[13~15];在半干旱沙地进行的研究,揭示了土壤呼吸与土壤基质及环境要素的关系^[16,17];但这些研究大部分都是基于较短时段的试验观测研究,而且缺少不同下垫面之间的对比研究。本项研究选择腾格里沙漠东南缘的植被区和流沙区进行对比观测,研究该区土壤呼吸特征,量化该区土壤呼吸与温度、水分之间关系,为准确估测干旱地区土壤呼吸提供基础数据。

1 研究区概况

试验观测在中国科学院沙坡头沙漠研究试验站进行。沙坡头位于腾格里沙漠东南缘,属于阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带。流沙区天然植被以花棒(*Hedysarum scoparium*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等沙生植物为主,盖度小于 1%。地貌特征为高大格状流动沙丘。沙层稳定含水量仅 2%~3%,地下水深度超过 80 m。该区多年平均气温 9.6℃,年均降雨量为 186.2 mm,且年、季变率极大;现有记录表明,降水最少的年份仅为 77.9 mm(2005 年),最多的年份高达 495.8 mm(1978 年),两者相差 417.3 mm,超过了多年平均降水量的两倍。与多年平均值相比,野外观测的当年(2007 年)降水偏多,为 271.2 mm,4~10 月份的降水量占全年降水量的 92%,每月观测日前 10 日内的降水量见图 1。

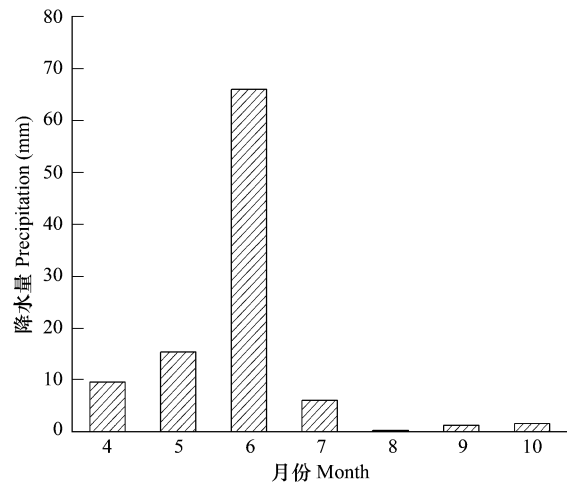


图 1 每月测定日前 10d 内降水量

Fig. 1 Precipitation amount in ten days before each measurement

本研究在沙坡头站水分平衡观测场及临近的流动沙丘进行。水分平衡观测场占地面积为 1 hm²,主要灌木种类为柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)。本观测点选在油蒿植被群落。植被调查结果表明,该群落灌木盖度为 16%,平均株高 57.76 cm;植物生长季 1 年生草本的平均盖度为 15%,植被详细资料见张志山等^[18]。对植被区生物土壤结皮的调查表明,结皮平均盖度为(34.0 ± 6.7)%,结皮层及亚土层平均厚度为(12.3 ± 3.1) mm。

2 研究方法

2.1 样地设置与测定方法

试验观测于 2007 年 4 月至 10 月植物生长季进行。开始测定前 2 周,将直径 10 cm、高 5 cm 的 PVC 土壤环插入土壤 3 cm,直至整个试验结束时取出土壤环。其中,在流沙区随机布置了 3 个土壤环;在植被区随机选取

3 株油蒿,土壤环分别布置在每株油蒿的灌丛下、灌丛边和裸地,距离植株主干分别为 10、50、100cm。

每月 20 日左右利用 LI-6400-09 土壤呼吸室(Li-COR, INC. USA)观测土壤呼吸速率的昼夜变化,测定时间为从 9:00 至次日 7:00,观测间隔 2h。同步测定土壤水分和温度。其中,土壤表层水分(0~5cm)采用 TDR (Model 6050X1, Ease System I, Soil moisture Equipment Corp., USA)测定;土壤温度采用温度计测定,观测深度为 5cm(WQG-15, 中国,唐山)。

2.2 数据分析

利用加权平均法计算出植被区的土壤呼吸速率,根据土壤环距离植株主干的距离,将距离植株主干 10、50、100cm 处土壤呼吸速率的权重值分别为 0.1、0.4、0.5。

数据的统计分析采用 SPSS(13.0)软件通过以下步骤来实现:差异显著性检验采用一维方差分析,用 Tukey 检验;以地表 5cm 土壤温度、0~5cm 土壤含水量为自变量,以土壤呼吸速率为因变量,采用 Stepwise 方法进行多元回归分析。

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸速率的日变化

在整个生长季节,植被区和流沙区土壤呼吸速率日变化过程均呈单峰曲线(图 2)。最低值出现在夜间 3:00~5:00,最高值出现在 13:00~15:00。流沙区的土壤呼吸速率日变化幅度较小,在 $0 \sim 0.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,且不同月份土壤呼吸速率日平均值之间的差异不显著(表 1);而植被区土壤呼吸速率的日变化幅度较大,在 $0 \sim 2.88 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,日均土壤呼吸速率最高值出现在 6 月,最低值出现在 8 月,除 6 月份植被区土壤呼吸速率与其它月份有显著差异之外,其他月份之间均无显著性差异(表 1)。在整个生长季,植被区与流沙区的土壤呼吸存在显著性差异($p < 0.05$),土壤呼吸速率平均值分别为 $(0.483 \pm 0.033) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (植被区)和 $(0.107 \pm 0.008) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (流沙区)。

不同测定日 0~5cm 土壤含水量的日均值如表 1 所示。植被区和流沙区日平均土壤含水量的变化范围分别为:3.66%~10.72%、4.38%~9.88%,平均值分别为 6.78%、6.94%。在整个测定期间,4、5、6 月份土壤含水量较高,均与其他月份有显著性差异(表 1),且 4、5、6 月份的土壤含水量均大于整个测定期间的平均值。

与土壤呼吸速率日变化趋势相似,植被区和流沙区地表 5cm 土壤温度的日变化都呈现明显的单峰变化,最高值出现在 15:00~17:00 之间,最低值出现在 5:00~7:00 之间。植被区与流沙区的平均土壤温度为 21.10、22.18℃。

表 1 不同测定日土壤呼吸速率、地表 5cm 处土壤温度、土壤含水量的平均值

Table 1 Mean value of soil respiration rate, soil volumetric moisture and soil temperature

月-日 Mont. -day	土壤呼吸速率		温度		水分	
	Soil respiration rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)		soil volumetric moisture (%)	
	植被区 Revegetated area	流沙区 Shifting sand area	植被区 Revegetated area	流沙区 Shifting sand area	植被区 Revegetated area	流沙区 Shifting sand area
04-24	0.361 $\pm$ 0.133a	0.173 $\pm$ 0.066a	16.67 $\pm$ 2.55b	17.50 $\pm$ 2.46b	9.51 $\pm$ 0.35a	9.88 $\pm$ 0.35a
05-24	0.518 $\pm$ 0.125a	0.178 $\pm$ 0.052a	20.53 $\pm$ 2.04ab	22.49 $\pm$ 1.15ab	8.95 $\pm$ 0.39a	8.51 $\pm$ 0.14b
06-22	1.330 $\pm$ 0.219b	0.138 $\pm$ 0.044a	21.49 $\pm$ 1.70ab	22.49 $\pm$ 1.33ab	10.72 $\pm$ 0.88a	9.25 $\pm$ 0.45ab
07-23	0.279 $\pm$ 0.044a	0.134 $\pm$ 0.035a	27.88 $\pm$ 2.24a	27.47 $\pm$ 1.53a	4.56 $\pm$ 0.06b	5.78 $\pm$ 0.10c
08-24	0.284 $\pm$ 0.067a	0.107 $\pm$ 0.024a	27.10 $\pm$ 1.72a	26.62 $\pm$ 1.72a	3.66 $\pm$ 0.12b	4.38 $\pm$ 0.06d
09-22	0.320 $\pm$ 0.026a	0.085 $\pm$ 0.015a	22.74 $\pm$ 1.64ab	25.21 $\pm$ 1.91a	3.87 $\pm$ 0.08b	5.23 $\pm$ 0.08cd
10-21	0.299 $\pm$ 0.064a	0.069 $\pm$ 0.024a	11.29 $\pm$ 1.47b	13.47 $\pm$ 1.80b	6.06 $\pm$ 0.33b	5.56 $\pm$ 0.13c

数据为平均值 $\pm$ 标准误 Date are means $\pm$ SE; 数据后字母相同表示均值在 $p < 0.05$ 水平上差异不显著,不同字母表示均值在 $p < 0.05$ 水平上差异显著 Same letters indicate have no significant differences between mean values at $p < 0.05$ level and the different letters indicate the significant differences between mean values at $p < 0.05$ level

3.2 土壤呼吸与土壤含水量之间的关系

当 0~5cm 土壤含水量 > 测定期间平均值时,植被区和流沙区的土壤呼吸速率明显高于土壤含水量 < 测

定其间平均值时的土壤呼吸速率,其平均值之比分别为:2.6(植被区)、1.5(流沙区)。

从整个生长季节来看,植被区的土壤呼吸与土壤含水量之间存在着共同的变化趋势(图2),土壤呼吸的峰值与低谷与土壤含水量的变化同步;而在流沙区,土壤呼吸与土壤含水量的变化不同步。无论是在植被区

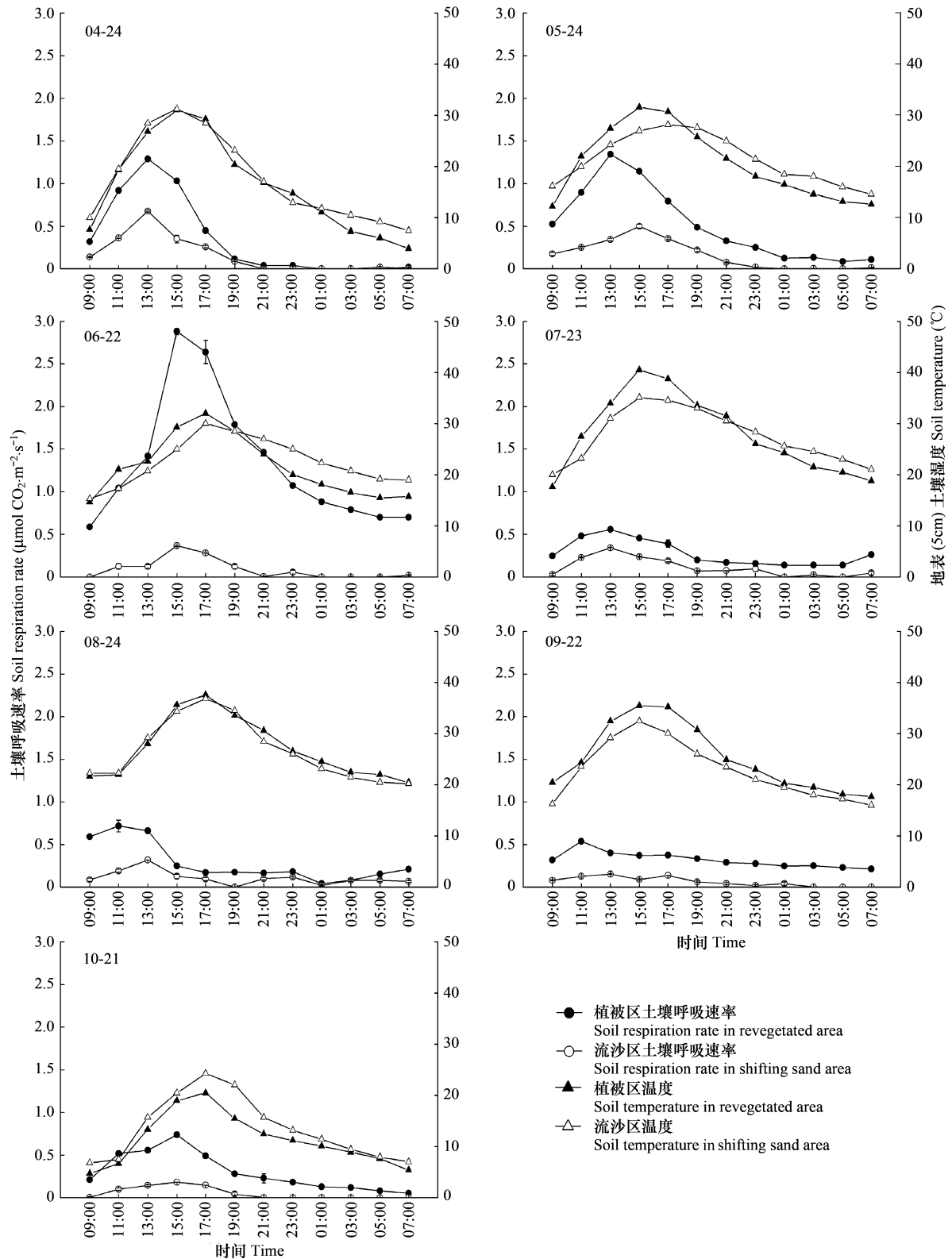


图2 土壤呼吸速率、地表5cm处土壤温度的日变化动态

Fig. 2 Daily dynamics of soil respiration rate, soil temperature

还是流沙区,土壤呼吸与土壤含水量均呈线性关系(图3),但是植被区土壤呼吸与土壤含水量之间的相关性好于流沙区。

3.3 土壤呼吸与温度的关系

土壤呼吸速率与地表5cm土壤温度的日变化规律基本一致,有很好的相关性。试验期间土壤含水量变化较大,为了研究在不同的土壤水分状况下土壤呼吸对温度的响应情况,将土壤水分分为大于平均值、小于平均值两个水平。不同水分状况下土壤呼吸与温度的关系见图4。在不同的水分状况下土壤呼吸速率与5cm土壤温度均呈指数关系(图4),在土壤水分含量大于测定期间的平均值时,指数模型的拟合效果较好。以图4中土壤呼吸与温度的指数模型为基础,计算 Q_{10} 。当土壤含水量<平均值时,植被区与流沙区的 Q_{10} 分别为:1.23、1.43;当土壤含水量>平均值时,分别为:2.23、1.72。

3.4 多元回归分析

以地表5cm土壤温度、0~5cm土壤含水量为自变量,以土壤呼吸速率为因变量,采用Stepwise方法进行多元回归分析,得到的回归方程见表2。

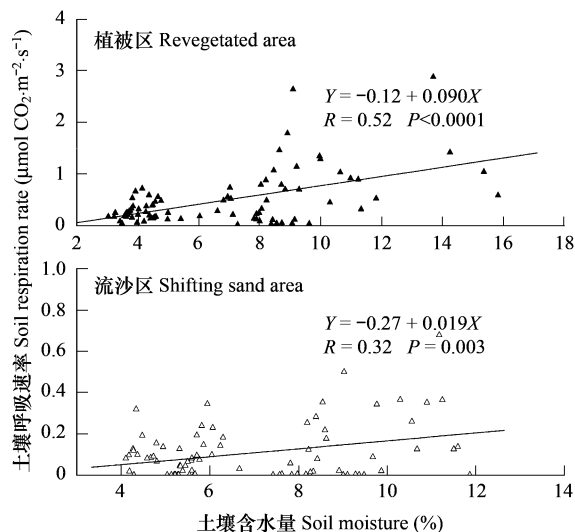


图3 土壤呼吸与土壤含水量之间的关系

Fig. 3 Relationship between soil respiration rate and soil moisture

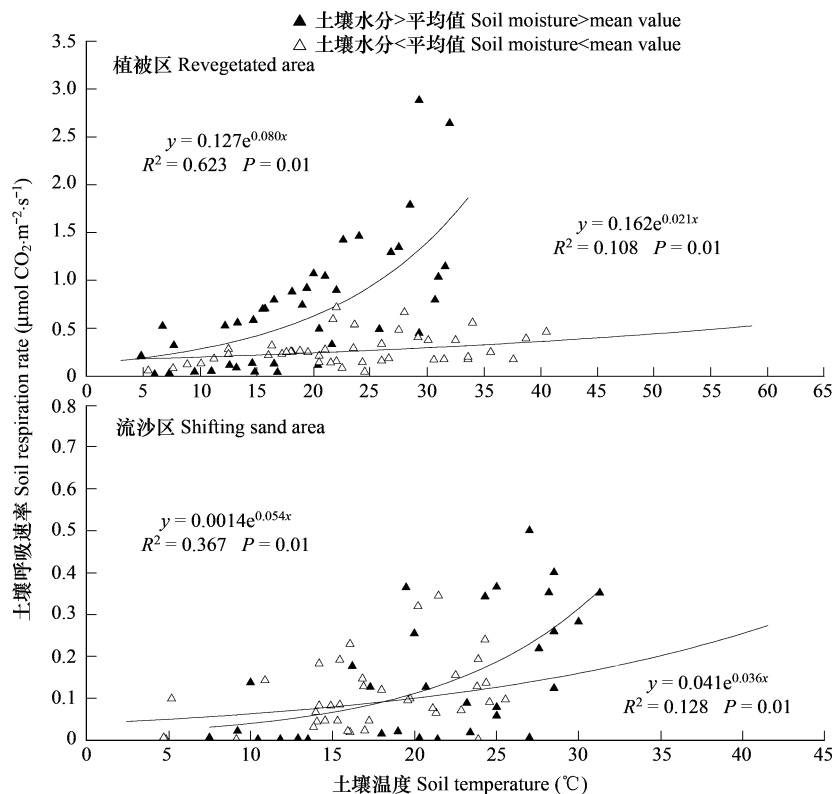


图4 不同土壤水分条件下土壤呼吸速率与温度的关系

Fig. 4 Relationship between soil respiration rate and soil temperature

4 结论与讨论

土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程,受到多种因素的作用,这使得土壤呼吸一方面具有某种规律,另一

方面又表现出不规则的变化,显示了相当的复杂性^[19],但是土壤呼吸直接或间接的受到温度和水分的控制^[8]。温度被认为是影响土壤呼吸的关键因素,不同的研究地区所得到的温度与土壤呼吸的关系可能不尽相同,但是温度对土壤呼吸的影响几乎总是可以用一个指数模型来表示^[20, 21],并以此为基础,研究者们用 Q_{10} 值来说明土壤呼吸随温度的变化情况。研究表明,温带地区 Q_{10} 为 2.4^[1],全球 Q_{10} 平均值为 1.57^[19]。

表 2 土壤温度、土壤水分与土壤呼吸速率的多元回归分析

Table 2 Regression of soil respiration rate, soil volumetric moisture and soil temperature

项目 Item	土壤含水量 < 平均值 Soil moisture < mean value	土壤含水量 > 平均值 Soil moisture > mean value
植被区 Revegetated area	$y = -0.138 + 0.008t + 0.052w$ $R^2 = 0.177 \quad p < 0.05 \quad n = 41$	$y = -0.940 + 0.055t + 0.065w$ $R^2 = 0.525 \quad p < 0.01 \quad n = 43$
流沙区 Shifting sand area	$y = -0.161 + 0.005t + 0.028w$ $R^2 = 0.217 \quad p < 0.05 \quad n = 48$	$y = -0.751 + 0.014t + 0.066w$ $R^2 = 0.516 \quad p < 0.01 \quad n = 36$

y: 土壤呼吸速率 Soil respiration rate; w: 5cm 土壤水分 Soil moisture; t: 0~5cm 土壤温度 Soil temperature

本研究中土壤呼吸速率与地表 5cm 处土壤温度的相关性很好,且存在着很显著的指数关系。当土壤含水量小于平均值时,植被区与流沙区的 Q_{10} 值分别为:1.23、1.43,当土壤含水量大于平均值时, Q_{10} 值分别为:2.23、1.72。当土壤含水量较高,植被区土壤呼吸速率的 Q_{10} 值明显增加,且与温带地区的 Q_{10} 值比较接近,流沙区的增加较小;当土壤含水量较低时,植被区与流沙区的 Q_{10} 值均低于温带地区的 Q_{10} 值,该区 Q_{10} 值偏低可能是由于土壤水分影响了土壤微生物和植物根系对温度的响应,从而也说明了该区土壤呼吸的温度敏感性受水分的影响。

土壤水分对土壤呼吸的影响比较复杂,不同的生态系统中水分对土壤呼吸的影响方向和程度有很大的差别^[22]。在土壤水分含量充足、不成为限制因子的条件下,土壤呼吸与土壤温度呈正相关;而在水分成为限制因子的干旱、半干旱地区,土壤呼吸受到水分含量和温度的共同影响^[19]。

本研究处于干旱的沙漠边缘地带,对于这里的植物和微生物来说,土壤水分是一个极其重要的限制因子。当土壤含水量稍有增加时,土壤呼吸量也迅速增加。本试验中的结果显示:0~5cm 土壤含水量与土壤呼吸呈显著的线性关系。当 0~5cm 土壤含水量大于平均值时,植被区和流沙区的土壤呼吸速率明显高于土壤含水量小于平均值时的土壤呼吸速率,其平均值之比分别为:2.6、1.5。当土壤含水量较高时,土壤呼吸速率明显增加,且以植被区增加最大。

在本实验中,植被区土壤呼吸的日变化与土壤温度的日变化趋势相似,都表现出单峰变化的趋势,这可能是温度的影响。但是在土壤含水量较高的 4、5、6 月份,土壤呼吸的值明显升高,而且日变化幅度也较大,其中以土壤含水量最高的 6 月份变化幅度最大;而在土壤含水量较低的其他月份,土壤呼吸的值较小,且日变化幅度也较小(图 2)。这说明,土壤呼吸的日变化趋势受温度的影响,但是变化的幅度却要受到水分的影响。在流沙区,整个测定期间土壤呼吸的日变化幅度都较小,这说明土壤含水量对该区土壤呼吸的影响较小。因此,土壤含水量的变化仅影响了植被区土壤呼吸的日变化幅度,而对流沙区没有显著的影响。造成这一结果的原因可能是由于植被区的土壤微生物数量、土壤有机质、植被盖度、结皮厚度等均高于流沙区,土壤含水量通过对植物和微生物的生理活动、微生物的能量供应^[21, 23]和体内再分配^[24]等的调节和控制来间接的影响土壤呼吸。

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 (B): 81—99.
- [2] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71—90.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7—20.

- [4] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23—36.
- [5] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 1—6.
- [6] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its variation in Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 1998, 205: 135—146.
- [7] 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 Xilin river basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 2: 202—209.
- [8] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, 1977, 43: 449—528.
- [9] Gullledge J, Schimer P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of Taiga Forest stands in Interior Alaska. *Ecosystems*, 2000, 3: 269—282.
- [10] Luo Y, Wan S, Hui D. *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622—625.
- [11] Smith J L, Halvorson J L, Bolton J H. Soil properties and microbial activity across 500 m elevation gradient in a semi-arid environment. *Soil Biology Biochemistry*, 2002, 34: 1749—1757.
- [12] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environment factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 383—390.
- [13] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, *et al.* Soil respiration in desert ecosystems of the arid region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 1911—1922.
- [14] Zhu H, Zhao C Y, Li J, *et al.* Analysis on Respiration of soil in scrublands and its affecting factors in arid areas. *Arid Land and Geography*, 2006, 29(26): 856—860.
- [15] Huang X, Li W H, Chen Y N, *et al.* Soil respiration of desert riparian forests in the lower reaches of Tarim River as affected by air temperature at 10cm above the ground surface and soil water. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1951—1959.
- [16] Su Y Z, Zhao H L, Li Y L, *et al.* Carbon mineralization potential in soil of different habitats in the semiarid Horqin Sandy Land: A laboratory experiment. *Arid Land Research and Management*, 2004, 18: 1—12.
- [17] Li Y Q, Zhao H L, Zhao X Y, *et al.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different sand dune types. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 154—158.
- [18] Zhang Z S, Fan H W, Zhao J L, *et al.* Root distribution and dynamics of revegetated communities in desert area. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(4): 637—643.
- [19] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469—476.
- [20] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8: 315—323.
- [21] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo I L, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forest and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53—69.
- [22] Su Y H, Feng Q, Zhu G F, *et al.* Progress in research on soil respiration. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 58—65.
- [23] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1984, 48: 1267—1272.
- [24] Rosacker L L, Kieft T L. Biomass and adenylate energy charge of a grassland soil during drying. *Soil biology Biochemistry*, 1990, 22: 1121—1127.

参考文献:

- [7] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河典型退化群落土壤呼吸的影响, *植物生态学报*, 2003, 2: 202—209.
- [13] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸. *生态学报*, 2008, 28(5): 1911—1922.
- [14] 朱宏, 赵成义, 李君, 等. 干旱区荒漠灌木林地土壤呼吸及其影响因素的分析. *干旱区地理*, 2006, 29(26): 856—860.
- [15] 黄湘, 李卫红, 陈亚宁, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27(5): 1951—1959.
- [17] 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 等. 土壤温度和水分对不同类型沙丘土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 154—158.
- [18] 张志山, 樊恒文, 赵金龙, 等. 沙漠人工植被群落的根系分布及动态. *中国沙漠*, 2006, 26(4): 637—643.
- [19] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下的温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469—476.
- [22] 苏永红, 冯起, 朱高峰, 等. 土壤呼吸与测定方法研究进展. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 58—65.