

温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响

张丽华 陈亚宁* 赵锐锋 李卫红

(中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要 荒漠对气候变化具有高度敏感性, 深刻认识和量化非生物因子对荒漠生态系统土壤呼吸的影响具有重要意义。采用自动CO₂通量系统(Li-8100)监测了梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、假木贼(*Anabasis aphylla*)和盐穗木(*Halostachys caspica*)群落生长季土壤呼吸及温度、土壤含水量等, 深入分析了水热因子对土壤呼吸的影响。土壤呼吸具有不对称的日格局, 最小值出现在8:00, 最大值在12:00-14:00。土壤呼吸的季节格局与气温变化基本同步, 最小值在生长季末期(10月), 最大值在生长季中期(6-7月)。梭梭、假木贼和盐穗木群落生长季平均土壤呼吸速率分别为0.76、0.52和0.46 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。气温对假木贼(51%)和盐穗木群落(65%)土壤呼吸季节变化的解释率高于梭梭(35%)。梭梭、假木贼和盐穗木群落土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})逐渐增大, 基础呼吸速率(R_{10})逐渐减小。剔除温度影响后, 梭梭、假木贼群落土壤呼吸与土壤含水量呈显著的幂二次方函数关系, 盐穗木群落两者关系却明显减弱, 未达到显著水平。气温、土壤含水量的二元方程均能解释群落土壤呼吸大部分的时间变异: 梭梭群落71%~93%、假木贼群落79%~82%、盐穗木群落70%~80%。人工模拟降水后土壤呼吸速率表现出降水后10 min减小、180 min时明显增加、达到最大值后再次衰减的现象。5和2.5 mm降水处理下的土壤呼吸速率最大值和其后的递减值高于对照处理, 土壤呼吸增加、达到峰值和其后递减过程与5 cm土壤温度变化基本同步。

关键词 土壤呼吸 温度 土壤含水量 人工降水 荒漠 干旱区

IMPACT OF TEMPERATURE AND SOIL WATER CONTENT ON SOIL RESPIRATION IN TEMPERATE DESERTS, CHINA

ZHANG Li-Hua, CHEN Ya-Ning*, ZHAO Rui-Feng, and LI Wei-Hong

Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China

Abstract Aims Our objective was to determine the impact of temperature and soil water content on soil respiration in *Haloxylon ammodendron*, *Anabasis aphylla* and *Halostachys caspica* desert communities.

Methods We measured soil respiration in the 2005 and 2006 growing seasons using an automated CO₂ efflux system (Li-Cor 8100). Air temperature (at 50 cm in height) and soil temperature (every 5 cm from 0 to 50 cm depth) were monitored at three points adjacent to the chamber using a digital thermometer at each site. Gravimetric soil moisture at 0-5, 5-15, 15-30, and 30-50 cm depths at three points was measured using the oven-drying method at 105 °C for 48 h. Water was added for artificial precipitation using plastic watering cans.

Important findings Soil respiration showed an asymmetric daytime pattern, with the minimum at 8:00 and the maximum at 12:00-14:00. The seasonal variation of soil respiration was characterized by a minimum in October and a maximum in June or July, which generally followed that of air temperature. The mean soil respiration rate in the growing season was 0.76, 0.52 and 0.46 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in *Haloxylon ammodendron*, *Anabasis aphylla* and *Halostachys caspica* communities, respectively. Air temperature explained >35%, 51% and 65% of seasonal variations of soil respiration in *Haloxylon ammodendron*, *Anabasis aphylla* and *Halostachys caspica* communities, respectively. Q_{10} values increased

收稿日期: 2008-10-13 接受日期: 2009-04-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD26B0901、2006BAC01A03 和 2007BAC15B08)和中国科学院研究生科学与社会实践资助专项(创新研究类)共同资助

在实验过程中得到袁素芬、张丽萍和刘谦同志的帮助, 深表谢意

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn
E-mail of the first author: zhangzhuang80@126.com

in *Haloxylon ammodendron* (1.35), *Anabasis aphylla* (1.41) and *Halostachys caspica* (1.52) communities, and R_{10} decreased 0.45, 0.30 and 0.22 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in each site, respectively. Significant power and quadratic relationships existed between normalized soil respiration and soil water content in the *Haloxylon ammodendron* and *Anabasis aphylla* communities, but not in the *Halostachys caspica* community. Two-dimensional equations based on temperature and soil water content explained most of temporal variations of soil respiration: 71%–93% in *Haloxylon ammodendron*, 79%–82% in *Anabasis aphylla* and 70%–80% in *Halostachys caspica*. Following artificial precipitation, the rate of soil respiration decreased, increased and then quickly decreased again, a pattern consistent with changes in soil temperature.

Key words soil respiration, temperature, soil water content, artificial precipitation, desert, arid region

DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.05.013

土壤作为一个巨大的碳库,是大气 CO_2 的重要源或汇,其轻微的变化也会导致大气中 CO_2 浓度明显改变。在 CO_2 浓度增加与气候变化的研究中,加强土壤 CO_2 释放研究,对估算未来大气 CO_2 浓度及全球变化具有举足轻重的意义(Liang *et al.*, 2004)。土壤呼吸是指土壤释放 CO_2 的过程,包括根际呼吸(根和根际微生物呼吸)和异养呼吸(包括土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸(Tang & Baldocchi, 2005))。温度和土壤含水量是影响土壤呼吸变化的关键环境因子,因此评价气候变化对生态系统碳释放的影响需要深刻认识和量化温度、湿度对土壤呼吸的影响(Davidson *et al.*, 1998; Betts, 2000; Cox *et al.*, 2000; Xu & Qi, 2001; Gaumont-Guay *et al.*, 2006)。

荒漠生境具有极端的非生物条件,大气和土壤含水量、养分、有机质含量低并存在明显变异(Noy-Meir, 1980)。由于土壤有机碳的含量相对较少,土壤呼吸是荒漠生态系统对气候变化最敏感的特性之一(West *et al.*, 1994)。荒漠生态系统中分散、不连续的降水对生物活性会起到激发作用(Huxman *et al.*, 2004; Sponseller, 2007)。世界荒漠分布面积约4 200万 km^2 ,我国国土总面积的1/5为荒漠,其中1/2的荒漠分布在新疆(孙鸿烈, 2005)。然而,对荒漠生态系统中环境因素控制土壤呼吸的机制尚缺乏研究(Fernandez *et al.*, 2006)。

为全面、定量评估非生物因素对荒漠土壤呼吸的影响,本文以准噶尔盆地梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、假木贼(*Anabasis aphylla*)和盐穗木(*Halostachys caspica*) 3个典型温带荒漠植物群落为研究对象,连续两个生长季(2005~2006年)监测土壤呼吸速率、土壤温度和湿度,分析土壤呼吸时间变异规律及群落间的差异,揭示温度、土

壤含水量对土壤呼吸及其温度敏感性的影响,探寻人工模拟降水条件下土壤呼吸速率的变化特征,为陆地生态系统碳循环对气候变化的响应过程研究提供科学依据。

1 研究区概况

研究区地处准噶尔盆地西北缘克拉玛依市农业开发区,北靠扎依尔山区,南接玛纳斯河下游冲积、湖积平原,地势西南高东北低,西南部海拔273~280 m,东北部海拔258~260 m。土壤类型主要有水成土纲的残余沼泽土(Relic bog soils)、盐碱土纲的残余盐土(Relic solonchaks)、初育土纲的荒漠风沙土(Desert aeolian soils)(钱亦兵等, 2004)。属典型的大陆性干旱荒漠气候,冬季严寒,夏季高温炎热,年平均气温8 $^{\circ}\text{C}$,年平均降水量105.3 mm,冬季无稳定积雪,年平均蒸发量达3 545 mm,春夏季多大风。

选择典型荒漠群落——梭梭、盐穗木和假木贼群落,并在每一群落内分别建立固定样地,大小为30 m \times 30 m(图1)。各群落0~50 cm平均土壤养分、盐分特征见表1。

梭梭群落(45 $^{\circ}$ 24.669' N, 84 $^{\circ}$ 50.489' E)内以梭梭为优势种,林下分布较多白刺(*Nitraria sibirica*)、无叶假木贼(*Anabasis aphylla*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)。草本层有骆驼蓬(*Peganum harmala*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)、猪毛菜(*Salsola* spp.)等。样地内梭梭高1~2.5 m,群落可明显分为梭梭层、假木贼及白刺层和草本层,盖度达50%以上。

假木贼群落(45 $^{\circ}$ 23.849' N, 84 $^{\circ}$ 51.431' E),以无叶假木贼为建群种,还分布有少量白刺、小獐毛(*Aeluropus pungens*)等,样地内无叶假木贼高

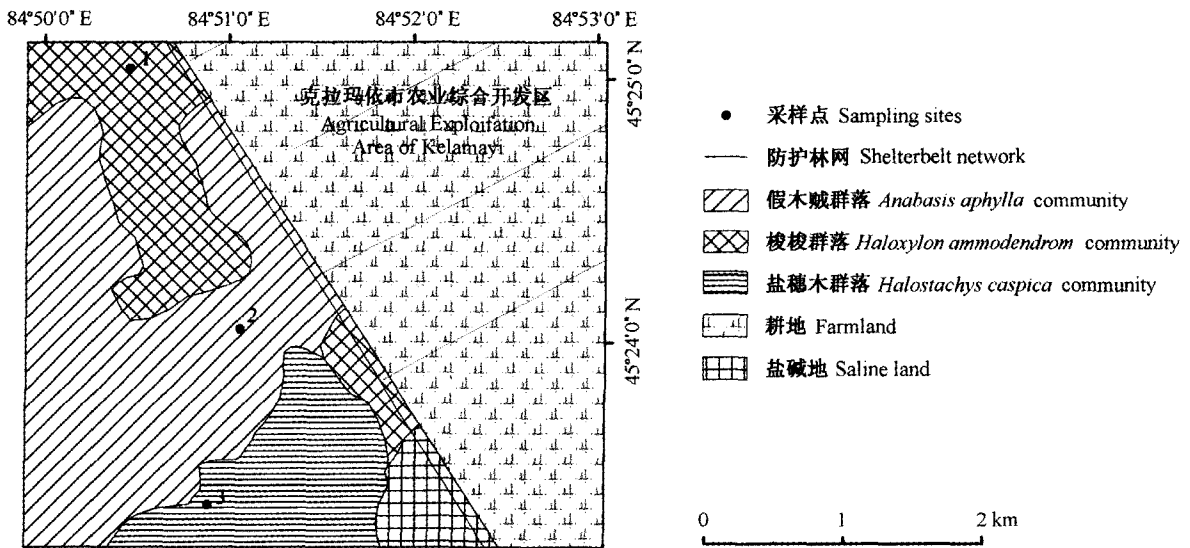


图1 研究区位置和不同群落样地分布图
Fig. 1 Location of study area and sample scheme of three different communities

表1 3种群落土壤养分和盐分特征
Table 1 Soil nutrient and salinity properties at three communities

群落 Community	有机碳 Organic carbon (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	pH 1:5	电导率 Electric conductivity (ms·cm ⁻¹)	全盐 Total salinity (g·kg ⁻¹)
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	3.153	5.436	0.278	0.687	19.166	11.385	3.670	241.000	9.090	0.616	2.157
假木贼 <i>Anabasis aphylla</i>	3.037	5.236	0.290	0.663	19.218	11.183	2.039	132.900	8.341	0.784	3.295
盐穗木 <i>Halostachys caspica</i>	3.361	5.795	0.326	0.758	20.692	9.869	5.901	129.100	8.125	1.923	6.788

度为50~70 cm, 盖度约20%。

盐穗木群落(45°23.080' N, 84°51.412' E)以盐穗木、琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)、白刺等为主, 还分布着盐节木(*Halocnermum strobilaceum*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、无叶假木贼、补血草(*Limonium suffruticosum*)、猪毛菜等。样地内盐穗木高度在70~85 cm, 盖度约为25%。

2 试验材料和方法

2.1 试验设置与测量方法

每个样地内设置5个土壤呼吸监测点, 梅花状分布, 每两个监测点的间距为20 m左右。在第一次测定时, 提前1~3 d将测定基座(Soil collar)嵌入土壤中。基座距植株的距离随机而定, 在10~110 cm之间。基座为直径10 cm、高10 cm的聚

氯乙烯圆柱体, 嵌入土中约7 cm。经过24 h的平衡后, 土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平, 从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动。土壤呼吸速率测定采用开路式土壤碳通量测量系统(Li-8100, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)。

2005年和2006年5~10月, 每月20日前后在每个样地分别测定土壤呼吸等相关参数。在每个测定日的8:00~20:00 (北京时间)每隔2 h测定1次土壤呼吸。在测定土壤呼吸速率的同时, 使用数字显示温度计(型号: WMY-01C, 上海华辰医用仪表有限公司)测定了距地面50 cm高度的气温和0~50 cm (5 cm间隔)的土壤温度, 采用烘干法测定了0~5、5~15、15~30和30~50 cm的土壤含水量。土壤温度和含水量在3个监测点进行重复测量。同

时分层(0~5、5~15、15~30和30~50 cm)取混合土样一份,带回实验室测定土壤养分和盐分含量。

人工模拟降水试验于2007年9月14和17日分别在盐穗木和假木贼样地进行。降水强度为5、2.5和0 mm(即对照);除对照外,每个降水处理设置3个重复测定。至少提前1 d将测定基座嵌入土壤中,并保证基座距植株基部50 cm。所选植株的冠幅、高度基本一致。以基座为中心的50 cm×50 cm范围,使用喷洒装置进行模拟降水,使5 mm和2.5 mm模拟降水单位时间的降水强度保持一致,水滴均匀落在指定范围内,并保证地表不形成径流。对模拟降水前(10:00)以及降水后10、60、180、300、420和540 min的土壤呼吸速率、土壤温度和土壤含水量进行测定。土壤呼吸测定仪器同上。测定土壤呼吸速率的同时,采用土钻取土,重量法测定0~10、10~20和20~30 cm土层的土壤含水量。使用地温计测定0、5、10、15、20和25 cm土壤温度。采用干湿度计测定空气相对湿度(距地面150 cm处)。

2.2 数据分析方法

分两步对土壤呼吸(R_s , $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)与温度(T , $^{\circ}\text{C}$)、土壤含水量(W_s , %)数据进行拟合。首先,采用指数方程(Eq.1)拟合 R_s 对 T 的响应关系。同时,采用线性、幂函数和二项式方程(Eq.2)对 R_s 与 W_s 间进行回归分析。方程如下:

$$R_s = ae^{bT} \text{ 和 } Q_{10} = e^{10b} \quad (1)$$

$$R_s = a + bW_s, R_s = aW_s^b, \text{ 或 } R_s = a + bW_s + cW_s^2 \quad (2)$$

式中, a 、 b 是拟合参数, Q_{10} 是土壤呼吸的温度敏感性系数。

其次,分别采用如下的线性和非线性方程拟合 R_s 和 T 、 W_s 间的关系:

$$R_s = a + b(TW_s) \quad (3)$$

$$R_s = a + bT + cW_s \quad (4)$$

$$R_s = aT^b W_s^c \quad (5)$$

$$R_s = ae^{bT} W_s^c \quad (6)$$

$$R_s = a + bT + cW_s + dTW_s \quad (7)$$

式中, a 、 b 、 c 是拟合参数。在方程(3)、(7)中,引入了新变量 $T \times W_s$ 。

所有数据统计分析在SPSS 11.5 (SPSS for Windows, Version 11.5, Chicago, IL)中完成。运用Levenberg-Marquardt运算法则确定参数,并使因变量的预测值和实测值间差异平方和达到最小。

3 结果和分析

3.1 土壤呼吸、土壤温度和水分的时间变化

3.1.1 土壤呼吸的日变化

3种群落土壤呼吸速率日变化均表现为不对称的单峰曲线形式,最低值出现在早晨8:00(北京时间),在12:00~14:00达到最高(图2)。在生长季,土壤呼吸速率日变化幅度通常小于 $1 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,为当日平均值的0.5~2倍不等。上午,土壤呼吸速率随温度上升而逐渐增加,下午其减小速度快于温度的下降速度;同时土壤呼吸最大值的出现早于气温和5 cm土壤温度。另外,9、10月8:00和20:00的土壤呼吸速率观测值多为负值($-0.1 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右),此时,气温和5 cm土壤温度在10~17 $^{\circ}\text{C}$ 之间。

3.1.2 土壤呼吸的季节变化

3个群落内气温表现出相似的时间变化趋势,在一年内都呈现不对称的“钟型”(图3a)。最低值出现在秋季(10月),最高值在夏季(7月)。与气温相比,0~5 cm平均土壤含水量波动明显,但都表现出类似的变化趋势,2005年呈现几个干湿循环,2006年又表现为自5月向10月递减的趋势(图3b)。盐穗木群落的土壤含水量最高,在5.42%~23.96%,平均值11.68%。梭梭群落的最低,在3.26%~10.36%之间波动,平均值5.77%。假木贼群落居中,变化范围为3.78%~18.63%,平均值为9.53%。

3种群落土壤呼吸的季节变化总体与气温同步,最低值出现在10月即生长季末期,最高值则在6月或7月(图3c)。2006年6~7月气温上升但呼吸速率下降,这可能是夏季干旱时因土壤含水量减少土壤呼吸速率受到抑制的表现。

两个生长季梭梭、假木贼和盐穗木群落的平均土壤呼吸速率分别为 (0.76 ± 0.33) 、 (0.52 ± 0.16) 和 $(0.46 \pm 0.15) \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (mean \pm SE, $n=12$),各群落平均为 $(0.58 \pm 0.26) \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。方差分析表明群落间土壤呼吸速率的差异总体上达到极显著($F=5.62$, $p<0.01$)。

3.2 土壤呼吸和温度、土壤含水量间的关系

3.2.1 土壤呼吸和温度间的关系

通过各温度指标与土壤呼吸间的回归分析得出气温与土壤呼吸间的拟合为最佳。采用指数方程能解释3种群落土壤呼吸季节变化的

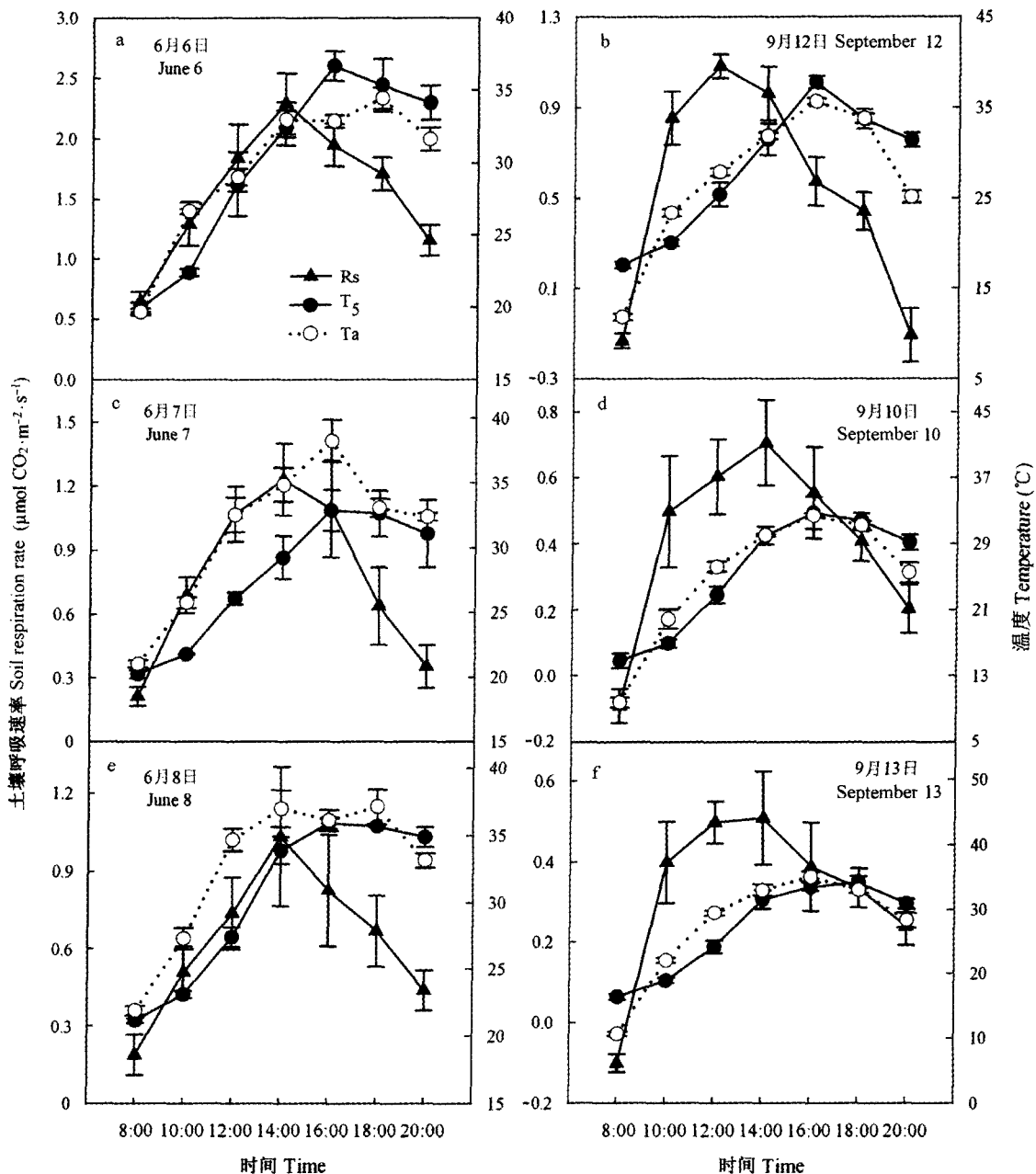


图2 梭梭群落(a、b)、假木贼群落(c、d)和盐穗木群落(e、f)在2006年6月和9月的土壤呼吸速率(R_s)、5 cm土壤温度(T_5)和气温(T_a)的日变化(数据点是观测时段的平均值和标准误差, 土壤呼吸重复数 $n=5$, 温度重复数 $n=3$)

Fig. 2 Diurnal variations of soil respiration rate (R_s) and temperature (T_5 : soil temperature at 5 cm depth, T_a : air temperature) of *Haloxylon ammodendron* (a, b), *Anabasis aphylla* (c, d) and *Halostachys caspica* community (e, f) in June and September, 2006. Error bars represent means \pm SE ($n=5$ for soil respiration rate, $n=3$ for temperature)

35%~65%。就单一群落看, 假木贼和盐穗木群落的土壤呼吸对气温的响应程度高于梭梭群落(图4)。

Q_{10} 是衡量土壤呼吸温度敏感性的指标。 R_{10} 是温度为10 °C时的土壤呼吸速率, 通常用作比

较生态系统的土壤呼吸特征。梭梭、假木贼和盐穗木群落的 Q_{10} 值分别为1.35、1.41和1.52, 平均值为1.41; R_{10} 分别为0.45、0.30和0.22 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均值为0.31。梭梭群落的 Q_{10} 值最低而 R_{10} 最大, 盐穗木群落则正好相反。

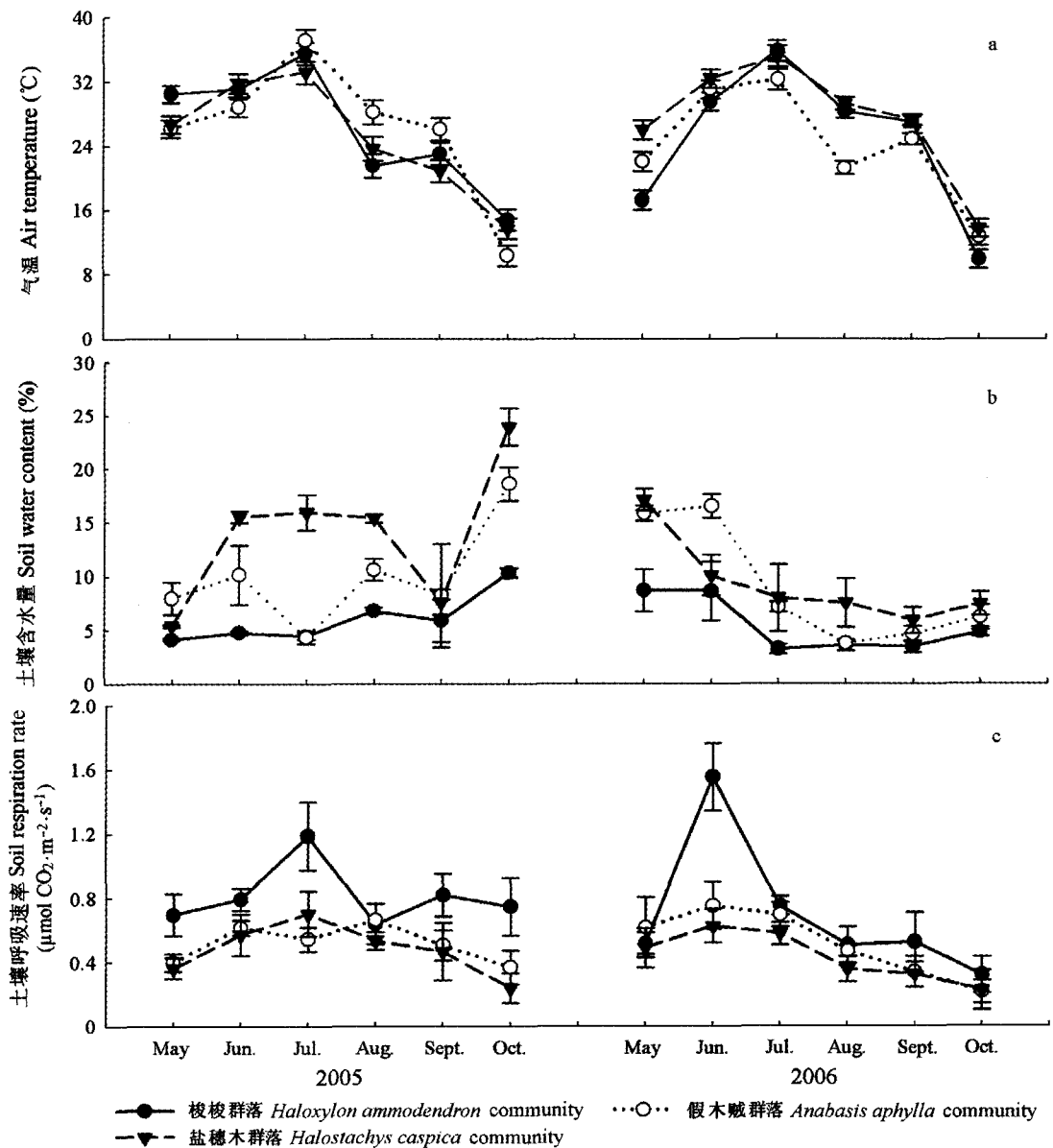


图3 气温(T_a)、0~5 cm平均土壤含水量(W_s)和土壤呼吸速率(R_s)的季节变化(平均值 \pm 标准误差, $n=7$)
Fig. 3 Seasonal variations of (a) air temperature (T_a), (b) soil water content over 0~5 cm depth (W_s) and (c) soil respiration rate (R_s) (mean \pm SE, $n=7$)

3.2.2 土壤呼吸与土壤含水量间的关系

表层土壤含水量波动大, 与土壤呼吸间的关系可能更明显, 因此分别采用线性、幂函数和二项式方程对土壤呼吸与0~5 cm土壤含水量间的关系进行了回归分析, 结果仅在盐穗木群落得出显著二项式拟合关系(表2)。

为了将气温对土壤呼吸的影响减小到最低, 我们首先采用下面的方程(9)计算10 °C时的土壤呼吸速率(R_{s10}), 然后分析了 R_{s10} 与0~5 cm土壤含

水量间的关系:

$$R_{s10} = R_{st} \times e^{b(10-t)} \quad (9)$$

式中, R_{st} 是与气温(T_a)相对应的土壤呼吸速率的测量值, b 是 R_s 与 T_a 间由指数方程得出的系数。由表2可知, 梭梭、假木贼群落10 °C时的土壤呼吸速率与土壤含水量间的拟合均达到显著或极显著水平, 变异解释量 R^2 也明显增加。而盐穗木群落标准化后的土壤呼吸与土壤含水量间的相关性减弱, 3种群落的综合分析结果未发生明显

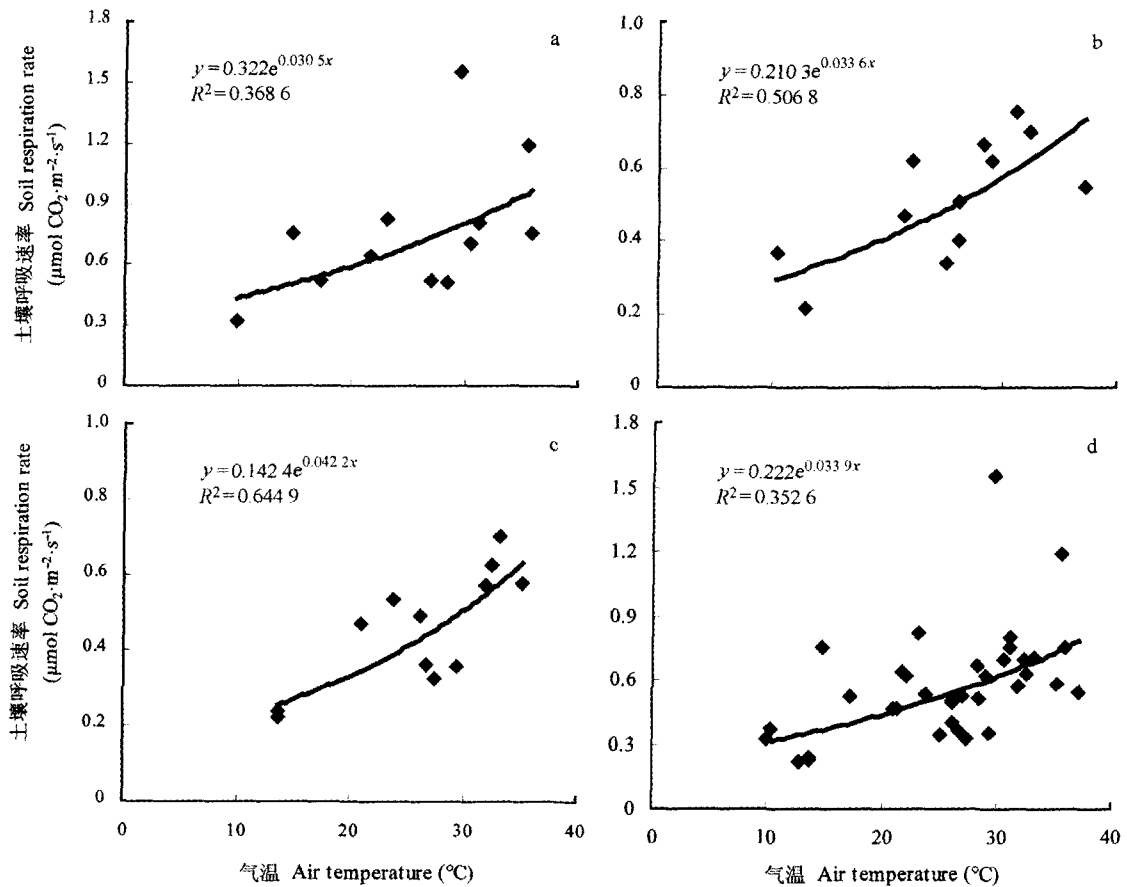


图4 采用指数方程对土壤呼吸(R_s)与气温(T_a)间关系的拟合

Fig. 4 Relationships between soil respiration rate (R_s) and air temperature (T_a) fitted with an exponential model

a: 梭梭群落 *Haloxylon ammodendron* community b: 假木贼群落 *Anabasis aphylla* community c: 盐穗木群落 *Halostachys caspica* d: 3种群落的综合数据 All data of three communities 每一个数据点是当日观测的平均值 Each value in the plot represents the average value of each site on measurement day

表2 土壤呼吸(R_s)及标准化到10 °C时的土壤呼吸速率(R_{s10})与0~5 cm土壤含水量间的拟合

Table 2 Fitted equations of R_s and R_{s10} (normalized soil respiration using the fit of Q_{10} function at 10 °C T_s) against W_{0-5} cm, respectively

群落 Community	样本数 <i>n</i>	R_s - W_s (实测土壤呼吸 For all measured efflux)	R^2	p	R_{s10} - W_s (标准化到10°C的土壤呼吸 For efflux at 10 °C)	R^2	p
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	12	$R_s=0.528+0.04W_s$	0.08	0.373	$R_s=0.175+0.05W_s$	0.50	0.010
	12	$R_s=0.439W_s^{0.276}$	0.07	0.412	$R_s=0.154W_s^{0.624}$	0.55	0.006
	12	$R_s=0.185+0.16W_s-0.009W_s^2$	0.09	0.642	$R_s=0.022+0.104W_s-0.004W_s^2$	0.51	0.040
假木贼 <i>Anabasis aphylla</i>	12	$R_s=0.416+0.011W_s$	0.11	0.300	$R_s=0.197+0.011W_s$	0.57	0.004
	12	$R_s=0.302W_s^{0.227}$	0.11	0.291	$R_s=0.141W_s^{0.341}$	0.51	0.010
	12	$R_s=0.126+0.077W_s-0.003W_s^2$	0.24	0.294	$R_s=0.165+0.018W_s-0.0003W_s^2$	0.58	0.020
盐穗木 <i>Halostachys caspica</i>	12	$R_s=0.415+0.004W_s$	0.02	0.680	$R_s=0.184+0.003W_s$	0.15	0.206
	12	$R_s=0.292W_s^{0.165}$	0.05	0.507	$R_s=0.122W_s^{0.246}$	0.28	0.075
	12	$R_s=-0.182+0.11W_s-0.004W_s^2$	0.63	0.012	$R_s=0.045+0.028W_s-0.001W_s^2$	0.48	0.053
综合 Total	36	$R_s=0.62-0.005W_s$	0.01	0.576	$R_s=0.349-0.001W_s$	0.002	0.764
	36	$R_s=0.579W_s^{-0.045}$	0.003	0.744	$R_s=0.318W_s^{-0.012}$	0.000 3	0.922
	36	$R_s=0.419+0.04W_s-0.002W_s^2$	0.05	0.400	$R_s=0.25+0.021W_s-0.001W_s^2$	0.04	0.538

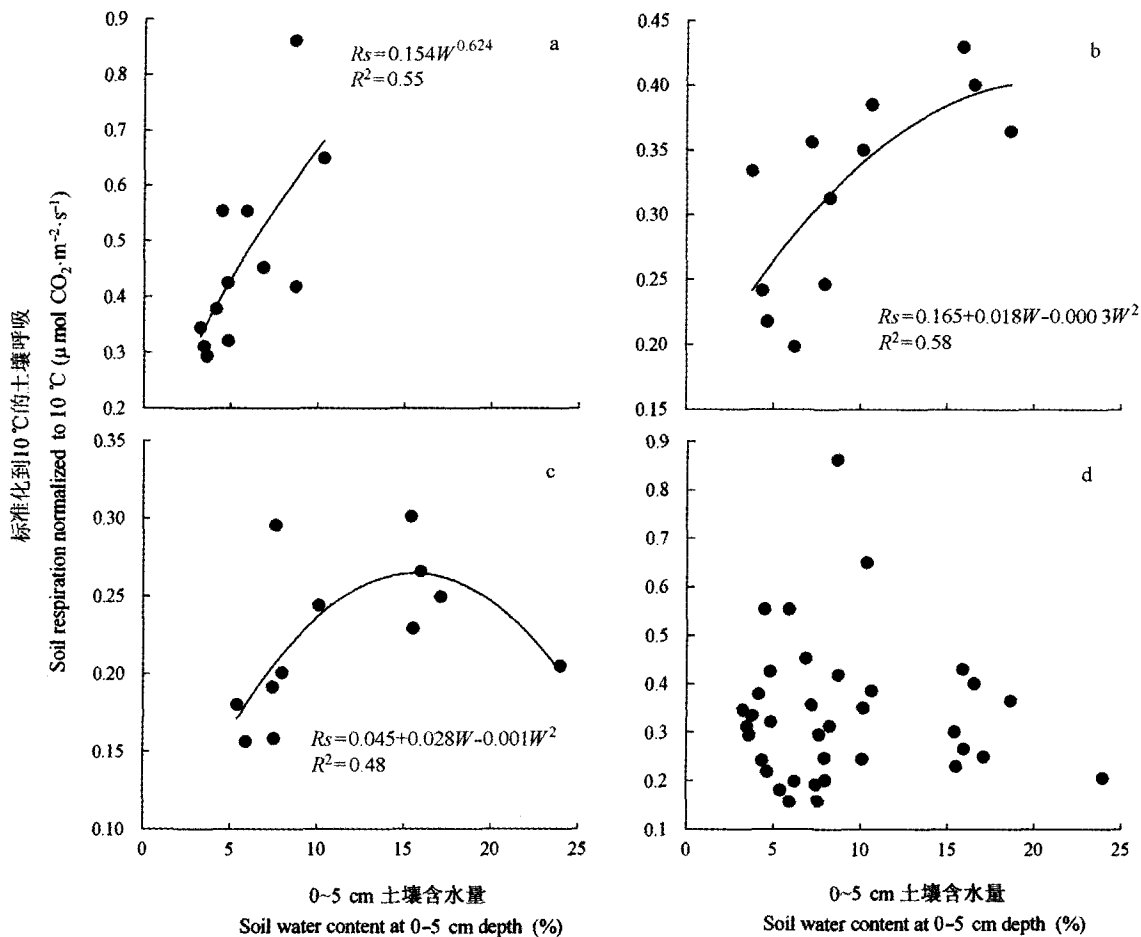


图5 采用 Q_{10} 函数标准化到10 °C的土壤呼吸速率与0~5 cm土壤含水量的拟合关系

Fig. 5 Relationships between the normalized soil respiration rate (R_{s10}) using the fit of the Q_{10} function with 10 °C T_s and soil water content (W_s) at the depth of 0-5 cm

实线代表回归拟合曲线 The solid line was the fitted regression line a、b、c、d: 同图4 See Fig. 4

改变。3种方程中以二次方函数的拟合效果更好。在假木贼和盐穗木群落,均表现出土壤含水量>15%时呼吸速率减小的趋势(图5)。

由以上分析进一步得出,温度较低时梭梭、假木贼群落表层土壤含水量对土壤呼吸的影响增加,并高于土壤呼吸对气温的响应,尤以梭梭群落更显著;盐穗木群落则相反。由此,低土壤含水量群落的土壤呼吸速率季节变化对土壤水分变化的响应与高土壤含水量群落相比更为敏感。

3.2.3 土壤呼吸速率与温度、土壤含水量的联合关系

基于温度的模型可以表示土壤呼吸与温度间的关系,但没有考虑土壤含水量的影响。同时,部分群落土壤含水量对标准化到10 °C的土壤呼吸

速率的变异解释量增加及拟合显著性增强(表2),因此,研究区土壤呼吸仍受到温度和土壤含水量的共同影响。

为了模拟温度、土壤含水量对土壤呼吸的综合影响,分别采用方程(3)~(7)分析温度、土壤含水量对呼吸的综合影响,拟合结果见表3。大多数拟合方程可用于描述土壤呼吸对温、湿度的综合响应,达到显著水平($p < 0.05$),但方程3的变异解释量在各群落中都最低,可见其适用性亦最低。其他4个方程拟合结果的差异不大,较一维方程 R^2 均有增加,梭梭群落变异解释量为71%~93%,假木贼群落79%~82%,盐穗木群落达70%~80%。最有意义的是方程(6),方程中的指数部分是 Q_{10} 函数,关于 R_s - W_s 的幂函数部分与前面得出的标

表3 土壤呼吸(R_s)与气温(T_a)、0-5 cm土壤含水量(W_{0-5})的回归方程
Table 3 Regression equations on soil respiration rate (R_s) against air temperature (T_a) and soil water content at 0-5 cm depth (W_{0-5})

群落 Community	样本数 n	$R_s=a+b(T_a)^c$ R^2	$R_s=aT^bW^c$ R^2	$R_s=ae^{bT+cW+dTW}$ R^2	R^2
梭梭 <i>Haloxyylon</i>	12	$R_s=-0.051+0.006TW$ 0.78**	$R_s=-0.847+0.038T^2+0.11W$ 0.71**	$R_s=0.02e^{0.067T}W^{0.098}$ 0.89*	$R_s=0.158-0.004T-0.066W+0.008TW$ 0.93*
假木贼 <i>Ammodendron</i>	12	$R_s=0.278+0.001TW$ 0.63**	$R_s=0.019T^{0.792}W^{0.357}$ 0.79**	$R_s=0.092e^{0.036T}W^{0.369}$ 0.81*	$R_s=0.02+0.012T+0.006W+0.001TW$ 0.79*
盐穗木 <i>Anabasis</i>	12	$R_s=0.232+0.001TW$ 0.49*	$R_s=0.007T^{0.033}W^{0.32}$ 0.70**	$R_s=0.07e^{0.043T}W^{0.303}$ 0.79*	$R_s=0.21+0.004T-0.016W+0.001TW$ 0.77*
综合 <i>Halostachys caspica</i> Total	36	$R_s=0.496+0*TW$ 0.03	$R_s=0.048T^{0.744}W^{-0.037}$ 0.24*	$R_s=0.228e^{0.032T}W^{0.041}$ 0.24*	$R_s=0.124+0.017T+0.001W-1 \times 10^{-6}TW$ 0.24*

*: F 检验达显著水平, $p < 0.05$. Significant at 0.05 confidence ** : F 检验达极显著水平, $p < 0.01$. Significant at 0.01 confidence

准化后土壤呼吸与土壤含水量间的关系一致。

3.2.4 人工模拟降水对土壤呼吸的影响

实施模拟降水前, 假木贼、盐穗木群落0~10 cm土壤含水量分别为3.49% ($\pm 0.28\%$, $n=3$)、5.70% ($\pm 0.80\%$, $n=3$)。降水后, 土壤含水量均增加(图6c、6d)。降水后60 min时, 5和2.5 mm降水处理下假木贼群落0~10 cm土壤含水量分别为6.22%和6.78%, 盐穗木群落则分别为13.58%和9.38%。

两种荒漠植物群落土壤呼吸速率均出现了模拟降水后10 min减小, 随后逐渐增加, 达到最大值后再次衰减的现象。模拟降水后10 min, 假木贼、盐穗木群落5 mm降水处理下的土壤呼吸速率分别由降水前的0.43和0.19 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小为0.36和0.17 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2.5 mm处理的土壤呼吸速率下降并不明显(图6a、6b)。受降水处理的土壤呼吸速率最大值出现滞后于对照, 5 mm处理的最大值发生在降水后300 min, 2.5 mm处理在180 min, 对照处理则出现在60~180 min。5和2.5 mm处理呼吸速率最大值及最大值后的递减速率普遍高于对照。两种群落土壤呼吸速率在降水后420~540 min内恢复到降水前水平。

假木贼群落在模拟降水后180 min前, 对照处理的土壤温度高于5和2.5 mm降水处理的, 此后, 降水处理的土壤温度高于对照处理(图6e)。盐穗木群落始终以2.5 mm降水处理的土壤温度为最高(图6f)。土壤温度均在降水后300 min即15:00时达到最高值, 与5 mm降水处理的呼吸速率峰值同步。

本文也记录了自然降水后土壤呼吸速率的变化。2006年5月10日13:00~14:00下起小冰雹, 持续约20 min。随后, 梭梭群落14:00时的土壤呼吸速率观测值由12:00的0.76 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降为0.58 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7a)。气温下降, 但5 cm土壤温度未下降。尽管16:00和18:00温度回升, 但呼吸速率并未随温度上升而增加。另外, 2006年8月17日16:00前下起时断时续的小雨, 假木贼群落土壤呼吸速率始终在低值范围内波动。但16:00后天气转晴, 呼吸速率随温度而变化(图7b)。2006年10月19日由于下雨, 假木贼群落14:00时的土壤呼吸较前一时段迅速下降。16:00时温度升到最高, 呼吸速率也提高到一个峰值, 18:00和20:00时又随温度减小(图7c)。雨后假木贼群落土壤呼吸出现随温度先下降后明显增加

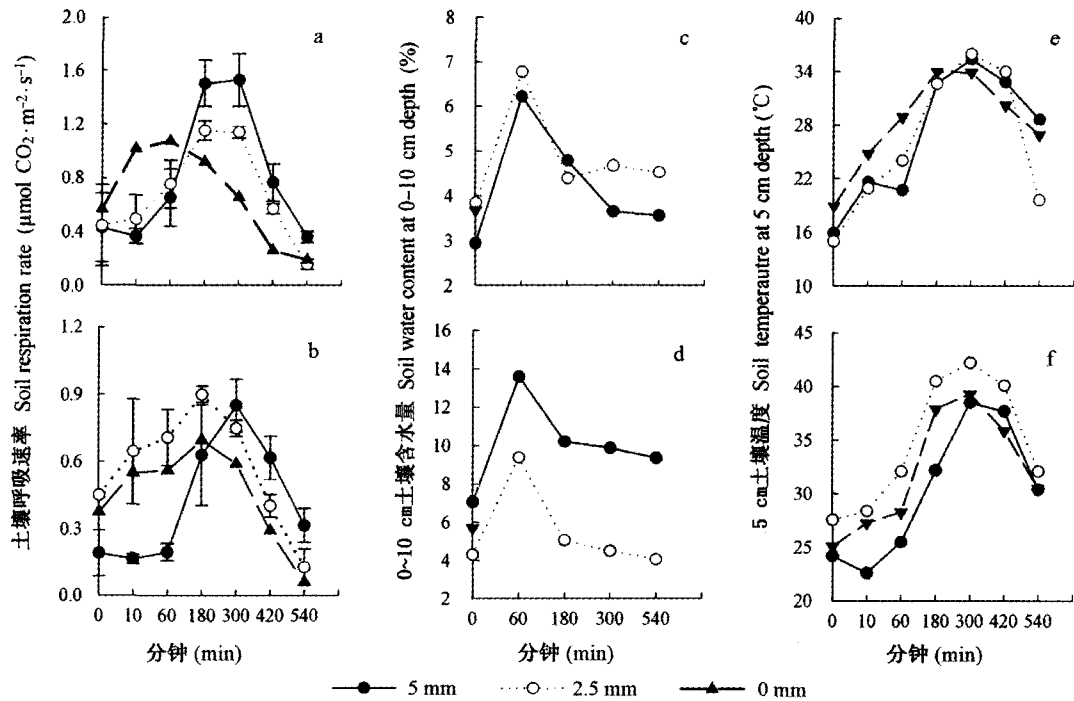


图6 模拟降水后,假木贼(a、c、e)、盐穗木(b、d、f)群落土壤呼吸速率、0~10 cm土壤含水量和5 cm土壤温度随时间变化(平均值±标准误差, $n=3$)

Fig. 6 Soil respiration rate, soil water content at 0–10 cm and soil temperature at 5 cm depth following rainfall additions in *Anabasis aphylla* (a, c, e) and *Halostachys caspica* communities (b, d, f) (mean±SE, $n=3$)

的现象。

4 讨论

4.1 土壤呼吸速率的时间变化

3种群落生长季平均土壤呼吸速率为 $(0.58 \pm 0.26) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文得出的结果与塔里木河中下游胡杨(*Populus euphratica*)林群落的土壤呼吸速率值接近(黄湘等, 2006)。而谢静霞等(2008)报道古尔班通古特沙漠南缘盐生荒漠土壤呼吸速率生长季平均仅 $0.08 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。首先, 上述研究中日呼吸速率值是24 h观测值的平均值, 不同于本研究的白天观测(8:00~20:00)平均值, 夜间和9、10月白天土壤呼吸速率观测值多为负值, 造成其结果明显低于本研究。另外, 盐生荒漠土壤的高盐碱和高钙含量是低呼吸速率的重要前提。需要说明的是, 本文在9和10月的8:00或20:00也观测到负的呼吸速率值, 尤其在早晨随温度增加呼吸速率变为正值。Xie等(2008)研究推论盐碱土存在吸收 CO_2 的无机过程。因而, 土壤

CO_2 负通量的发生机制有待于进一步研究。

土壤 CO_2 释放的季节格局总体上与近地面气温的变化趋势一致, 最大值出现在生长季中期(7月), 最小值发生在生长季末期(10月)。但2006年最大呼吸速率发生在6月, 早于气温的最大值(7月)。本文得出的季节格局与谢静霞等(2008)在盐生荒漠的研究结果类似。与2005年相比, 2006年土壤呼吸速率最大值与气温的不同步可能与土壤水分的差异有关。盛夏较低的土壤含水量会引起微生物活性下降, 从而对土壤呼吸产生抑制。Maestre和Cortina (2003)曾报道了地中海半干旱草原土壤呼吸在土壤温度最高、土壤湿度最低时也出现下降。然而, 地中海半干旱森林的盛夏虽然干旱, 但土壤呼吸速率仍达到最大值, 土壤呼吸季节格局主要与土壤温度关系密切(Casals *et al.*, 2000)。相对于草原和荒漠环境, 森林土壤持水力较高, 并且在高大冠幅影响下林下温度较低, 因而共同造成了土壤呼吸未受到干旱的抑制。

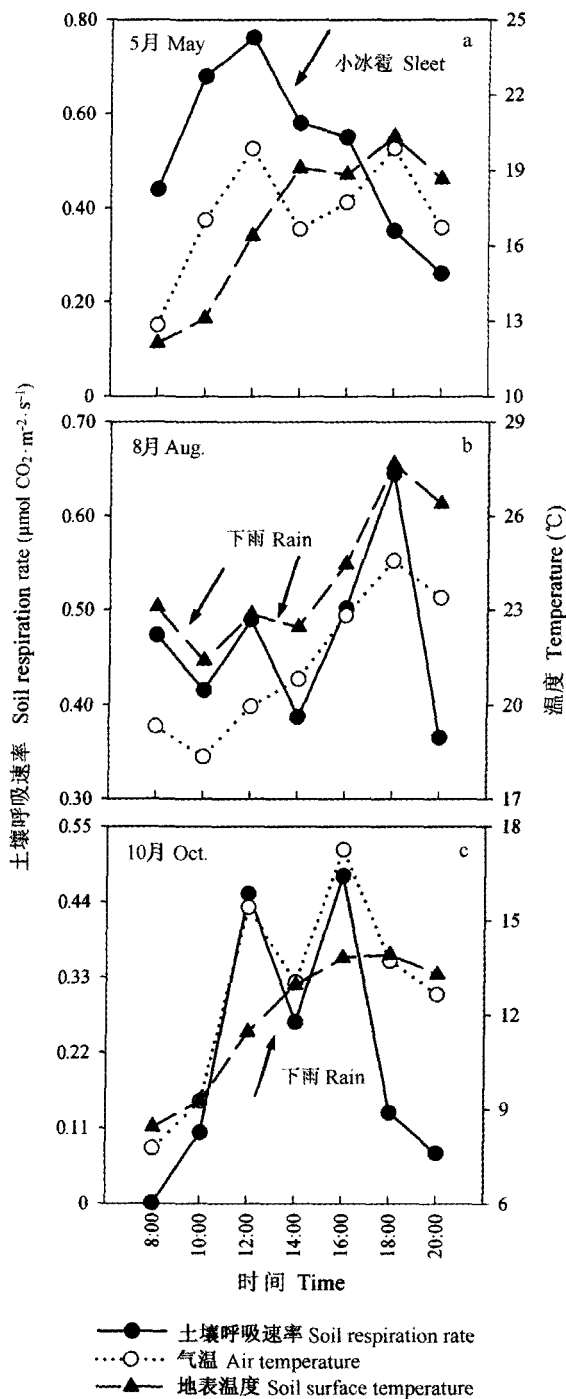


图7 2006年雨天梭梭(a)、假木贼(b、c)群落土壤呼吸速率、气温和地表温度的日变化

Fig. 7 Diurnal variations of soil respiration rate, air temperature and soil temperature at 0 cm depth on rainy days in 2006 in *Haloxylon ammodendron* (a) and *Anabasis aphylla* communities (b and c)

数据是观测时段的平均值，土壤呼吸速率重复次数 $n=5$ ，温度重复次数 $n=3$ Data are mean value on every sampling period ($n=5$ for soil respiration rate, $n=3$ for temperature)

4.2 土壤呼吸与温度、土壤含水量间的关系

温度、土壤含水量及其相互作用对土壤呼吸时间变异具有明显影响。3种群落气温对土壤呼吸季节变化的解释率随土壤含水量减小而下降，盐穗木群落为65%，假木贼群落51%，梭梭群落仅37%。土壤呼吸日变化与温度间的相关性也表现出由盐穗木群落到梭梭群落减弱。荒漠土壤呼吸速率与温度间的关系似乎受土壤含水量影响。Yuste等(2003)和Jassal等(2008)也得出当水分不受限制时呼吸速率季节变化与土壤温度密切相关。

梭梭、假木贼、盐穗木群落土壤呼吸 Q_{10} 值分别为1.35、1.41和1.52, R_{10} 分别是0.45、0.30和0.22 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。3种群落土壤呼吸的温度敏感性表现出随群落土壤含水量减小而增加，基础呼吸速率随土壤含水量减小而降低的现象。以前的研究也得出 Q_{10} 随土壤含水量下降而减小 (Xu & Qi, 2001; Borken *et al.*, 2002; Yuste *et al.*, 2003; Gaumont-Guay *et al.*, 2006; Jassal *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2008)。此外，由方程(1)可知 Q_{10} 值未独立于 R_{10} 值。梭梭群落较高的 R_{10} 但得出较小的 Q_{10} 。Davidson等(2006)也发现 R_{10} 较高的橡树 (*Quercus robur*)/杜鹃花 (*Rhododendron ponticum*) 样地，土壤呼吸速率高且季节变化大，但温度敏感性 Q_{10} 较低。因此，比较样地间 Q_{10} 值时应考虑基础呼吸速率的差异。基础呼吸速率与温度敏感性也都受气候变化的影响。

文中 R_{10} 随土壤含水量增加而减小，与Li等(2008)在中国北方山区研究得出不同海拔和植被覆盖的样地间基础呼吸速率与土壤含水量呈正相关的结论不同。梭梭群落的植物高度、盖度较另两种群落具有明显的优势，而地上植被的生产力与根系呼吸和土壤表面 CO_2 通量增加呈正比 (Davidson *et al.*, 2000)。常学向等(2003)得出植被覆盖度和长势越好的天然荒漠植被土壤含水率越低。盐穗木群落较低的地势和更细的土壤质地都有助于其保持较高的土壤含水量。因此，梭梭、假木贼、盐穗木群落的基础呼吸速率逐渐减小，但土壤含水量在增加。

土壤呼吸速率与土壤含水量间仅在盐穗木群落存在显著的二项式函数关系，梭梭、假木贼群落标准化到10 °C的土壤呼吸与土壤含水量拟合显著性提高，变异解释量增加。因此，在土壤含水量较低的群落，减小温度作用后土壤含水量对

呼吸的影响才显现。在盐穗木群落, 标准化到10℃时的土壤呼吸与表层土壤含水量间的关系弱化, 可能说明土壤呼吸季节变化未受到土壤水分抑制, 温度的作用相对更大。

将温度和土壤含水量作为自变量、土壤呼吸速率作为因变量的双变量模型被广泛应用于温、湿度对呼吸的影响研究中(Davidson *et al.*, 1998; Xu & Qi, 2001; Kang *et al.*, 2003; Jia *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008)。本文中, 与一维方程相比, 二维方程的变异解释量有一定增加, 这也符合前人的研究结果(Xu & Qi, 2001; Kang *et al.*, 2003; Gaumont-Guay *et al.*, 2006)。方程(4)~(7)对梭梭、假木贼、盐穗木群落土壤呼吸时间变异的解释范围分别为71%~93%、79%~82%和70%~80%, 这也表明呼吸速率的时间变化主要受到温度和土壤含水量控制。然而, 对3种群落综合数据的解释仅为24%。因此, 仍有其他因素控制土壤呼吸, 如NPP、根系生物量、微生物群落、根系氮浓度、土壤质地和基质数量与质量等(Buchmann, 2000; Fang & Moncrieff, 2001; Sánchez *et al.*, 2003; Dilustro *et al.*, 2005)。Han等(2007)发现生物量、NPP会影响玉米(*Zea mays*)地生长季的土壤呼吸, 将其引入指数模型后显著提高了方程解释量。Kirschbaum (2006)报道了基质可利用性会影响土壤呼吸的温度敏感性。因此, 需考虑将生物因素和土壤特性引入模型以提高土壤呼吸的预测和评估能力; 同时, 需深入研究群落间土壤呼吸对环境因子响应机理的差异。

4.3 人工模拟降水对土壤呼吸的影响

5和2.5 mm降水处理的土壤呼吸在人工降水180 min时明显增加, 呼吸速率峰值较对照更高, 但差距不大; 土壤呼吸达到峰值和其后的递减过程与温度日变化具有较高同步性。这与Sponseller (2007)的结果不同, 他的研究发现模拟降水后Sonoran荒漠土壤CO₂释放通量迅速增加了30倍, 在降水后48 h内又恢复到降水前的大小。在许多生态系统都观测到降水后、干旱土壤湿润后土壤CO₂释放的快速脉冲响应(Franzluebbers *et al.*, 2000; Borken *et al.*, 2003; Austin *et al.*, 2004)。然而, 这种CO₂脉冲通量的机制目前仍存在争议。它可能产生于土壤有机质可利用性增加和微生物活性提高, 土壤干旱时死亡微生物的分解等(Adu & Oades, 1978; Appel, 1998; Fierer & Schimel,

2003)。除上述生物机制外, 雨后荒漠生态系统土壤碳酸盐会释放出CO₂(Emmerich, 2003)。雨水下渗也可能置换土壤干旱时积累在土壤空隙中的CO₂气体(Huxman *et al.*, 2004)。本研究中观测到降水后土壤CO₂释放速率增幅较小, 可能与研究区土壤有机质含量低、不易分解以及微生物量活性有关。梭梭、假木贼、盐穗木群落0~5 cm土壤有机质含量分别为7.29、7.82和10.52 g·kg⁻¹。Degens和Sparling (1995)发现6次干-湿循环后沙漠土壤有机碳矿化未表现出增加, 认为其土壤有机碳稳定, 难以分解。Borken等(2002)指出, 使有机质层土壤呼吸速率增加的少量雨水, 未能缓解矿物质土呼吸受到的干旱抑制。此外, 研究区土壤质地较细, 导致雨水入渗量有限, 而且模拟降雨后较高的温度和强烈的水分蒸发造成表层土壤湿润状态仅在较短时间内持续, 从而影响了土壤CO₂释放对降水的响应过程。

本文得出5和2.5 mm模拟降水处理的土壤呼吸速率最大值及最大值后的递减速率普遍高于对照, 表明人工降水提高了土壤呼吸速率, 这与前人研究结果一致(Casals *et al.*, 2000; Maestre & Cortina, 2003; Fernandez *et al.*, 2006)。降水后10 min土壤呼吸速率减小, 主要是因为降水后水分迅速取代了表层土壤中气体的位置使土壤通透性变差, CO₂在土壤中的扩散阻力增大, 从而导致测定的土壤呼吸速率减小(Cavelier & Peñuela, 1990)。自然降水后假木贼群落土壤呼吸速率与温度同步变化(在没有土壤含水量日变化监测数据的前提下), 与人工模拟降水的结果一致。然而, 梭梭群落小冰雹事件后土壤呼吸速率并未随温度增加, 持续减小, 这可能由于土壤过湿抑制了土壤CO₂释放。因此, 当土壤含水量未超过一定阈值时, 温度对土壤呼吸起主要影响作用, 否则当土壤含水量过大时将会抑制土壤呼吸。

5 结论

梭梭、假木贼、盐穗木群落生长季的平均土壤呼吸速率分别为0.76、0.52和0.46 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹。通过指数方程气温解释了土壤呼吸季节变化的35%~65%。在假木贼、盐穗木群落土壤呼吸对温度变化的响应强于梭梭群落。土壤含水量对土壤呼吸的影响被高温掩盖, 因为土壤含水量对标准化到10℃的土壤呼吸影响更加显

著。与一维方程相比,以温度、土壤含水量为自变量的二维方程的变异解释量提高。模拟降水处理的土壤呼吸速率相对于对照处理有所提高,但增幅不大。人工降水事件后,土壤呼吸受到温度、土壤含水量共同影响。冰雹事件后土壤呼吸受到完全抑制。

参 考 文 献

- Adu JK, Oades JM (1978). Physical factors influencing decomposition of organic materials in soil aggregates. *Soil Biology & Biochemistry*, 10, 109–115.
- Appel T (1998). Non-biomass soil organic N: the substrate for N mineralization flushes following soil drying-rewetting and for organic N rendered CaCl₂-extractable upon soil drying. *Soil Biology & Biochemistry*, 30, 1445–1456.
- Austin AT, Yahdjian L, Stark JM, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta DA, Schaeffer SM (2004). Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 141, 221–235.
- Betts RA (2000). Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decrease in surface albedo. *Nature*, 408, 187–190.
- Borken W, Davidson EA, Savage K, Gaudinski J, Trumbore SE (2003). Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1888–1896.
- Borken W, Xu YJ, Davidson EA, Beese F (2002). Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 8, 1205–1216.
- Buchmann N (2000). Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 1625–1635.
- Casals P, Romanya J, Cortina J, Bottner P, Coûteaux MM, Ramon-Vallejo V (2000). CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, 48, 261–281.
- Cavelier J, Peñuela MC (1990). Soil respiration in the cloud forest and dry deciduous forest of Serrania de Macuria, Colombia. *Biotropica*, 22, 346–352.
- Chang XX (常学向), Zhao AF (赵爱芬), Zhao WZ (赵文智), Chen HS (陈怀顺) (2003). Status of soil moisture in oasis and desert unirrigated vegetation regional along middle reaches of Heihe River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 17, 126–129. (in Chinese with English abstract)
- Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA, Totterdell JJ (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184–187.
- Davidson EA, Belk E, Boone RD (1998). Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 4, 217–227.
- Davidson EA, Janssens IA, Luo Y (2006). On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀. *Global Change Biology*, 12, 154–164.
- Davidson EA, Verchot LV, Cattânio JH, Ackerman IL, Carvalho JEM (2000). Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 48, 53–69.
- Degens BP, Sparling GP (1995). Repeated wet-dry cycles do not accelerate the mineralization of organic C involved in the macro-aggregation of a sandy loam soil. *Plant and Soil*, 175, 197–203.
- Dilustro JJ, Collins B, Duncan L, Crawford C (2005). Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. *Forest Ecology and Management*, 204, 85–95.
- Emmerich WE (2003). Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116, 91–102.
- Fang C, Moncrieff JB (2001). The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 33, 155–165.
- Fernandez DP, Neff JC, Belnap J, Reynolds RL (2006). Soil respiration in the cold desert environment of the Colorado Plateau (USA): abiotic regulators and thresholds. *Biogeochemistry*, 78, 247–265.
- Fierer N, Schimel JP (2003). A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 789–805.
- Franzluebbers AJ, Haney RL, Honeycutt CW, Schomberg HH, Hons FM (2000). Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 613–623.
- Gaumont-Guay D, Black TA, Griffis TJ, Barr AG, Jassal RS, Nesic Z (2006). Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140, 220–235.
- Han GX, Zhou GS, Xu ZZ, Yang Y, Liu JL, Shi KQ (2007). Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem. *Plant and Soil*, 291, 15–26.
- Huang X (黄湘), Chen YN (陈亚宁), Li WH (李卫红), Liu JZ (刘加珍), Chen YP (陈亚鹏) (2006). Daily variation of carbon flux in soils of *Populus euphratica* forests in the middle and lower reaches of the Tarim River. *Progress in Natural Science* (自然科学进展),

- 16, 1405–1410. (in Chinese)
- Huxman TE, Snyder KA, Tissue D, Leffler AJ, Ogle K, Pockman WT, Sandquist DR, Potts DL, Schwinning S (2004). Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 141, 254–268.
- Jassal RS, Black TA, Novak MD, Gaumont-Guay D, Nesic Z (2008). Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. *Global Change Biology*, 14, 1–14.
- Jia B, Zhou G, Wang Y, Wang F, Wang X (2006). Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 67, 60–67.
- Kang S, Doh S, Lee D, Jin VL, Kimball JS (2003). Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology*, 9, 1427–1437.
- Kirschbaum MUF (2006). The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 2510–2518.
- Li HJ, Yan JX, Yue XF, Wang MB (2008). Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 490–503.
- Liang NS, Nakadai T, Hirano T, Qu LY, Takayoshi K, Yasumi F, Gen I (2004). *In situ* comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123, 97–117.
- Maestre FT, Cortina J (2003). Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 23, 199–209.
- Noy-Meir I (1980). Structure and function of desert ecosystems. *Israel Journal of Botany*, 28, 1–19.
- Qian YB (钱亦兵), Zhou HR (周华荣), Xu M (徐曼), Jiang J (蒋进), Wang XQ (王雪芹), Li DM (李东梅), Zhao CJ (赵从举) (2004). Relationship between water-soil properties and desert plant diversities in Agricultural Development Area of Kelamayi. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 18, 186–189. (in Chinese with English abstract)
- Sánchez ML, Ozores MI, López MJ, Colle R, de Torre B, Garia MA, Perez I (2003). Soil CO₂ fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118, 85–95.
- Sponseller RA (2007). Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. *Global Change Biology*, 13, 426–436.
- Sun HL (孙鸿烈) (2005). *Ecosystems in China* (中国生态系统). Science Press, Beijing, 653. (in Chinese)
- Tang JW, Baldocchi DD (2005). Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. *Biogeochemistry*, 73, 183–207.
- West NE, Stark JM, Johnson DW, Abrams MM, Wight JR, Heggem D, Peck S (1994). Effects of climatic change on the edaphic features of arid and semiarid lands of western North America. *Arid Soil Research Rehabilitation*, 8, 307–351.
- Xie JX (谢静霞), Zhai CX (翟翠霞), Li Y (李彦) (2008). Contrasting analysis on soil CO₂ efflux between saline desert and farmland. *Progress in Natural Science* (自然科学进展), 18, 262–268. (in Chinese)
- Xie JX, Li Y, Zhai CX, Li CH, Lan ZD (2008). CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. *Environment Geology*, doi:10.1007/s00254-008-1197-0
- Xu M, Qi Y (2001). Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in Northern California. *Global Change Biology*, 7, 667–677.
- Yuste JC, Janssens IA, Carrara A, Meiresonne L, Ceulemans R (2003). Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime forest. *Tree Physiology*, 23, 1263–1270.