

干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸

张丽华¹, 陈亚宁¹, 李卫红¹, 赵锐锋¹, 葛洪涛²

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

2. 新疆维吾尔自治区基础地理信息中心, 乌鲁木齐 830002)

摘要:采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统测定了准噶尔盆地高(B)、低(A)两个盖度级 3 个典型荒漠植物群落梭梭、盐穗木、假木贼的土壤呼吸速率,比较分析了各样地土壤呼吸的变化特征及水热因子对荒漠土壤呼吸特征的可能影响。结果表明:生长季,土壤呼吸速率存在明显的日变化和季节变化规律,不同盖度和群落类型的荒漠土壤呼吸速率变化形式基本相同。日变化格局最高值出现在 12:00~14:00,最低值在 8:00 或 20:00;夏季各月(6、7、8 月份)土壤呼吸速率高于秋季月份(9、10 月份),春季(5 月份)最低。高盖度梭梭群落样地日平均土壤呼吸速率与其他样地存在显著差异。各样地土壤呼吸速率与地表温度呈不同程度的正相关,而与土壤温度的相关性较弱;高盖度盐穗木样地(土壤湿度最高)、梭梭样地(土壤湿度最低)土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著负相关。地表温度-土壤湿度的多变量模型能在更大空间尺度解释荒漠土壤呼吸速率时间变化的 61.9%。样地间土壤呼吸速率的差异可能主要受土壤湿度影响。高、低盖度的梭梭、盐穗木和假木贼群落的 Q_{10} 值分别为 1.34、1.3、1.65、1.58、1.17 和 1.31,平均值 1.39。

关键词:荒漠生态系统;土壤呼吸;温度;土壤湿度; Q_{10}

文章编号:1000-0933(2008)05-1911-12 中图分类号:Q145, Q945, S154.1 文献标识码:A

Soil respiration in desert ecosystems of the arid region

ZHANG Li-Hua¹, CHEN Ya-Ning¹, LI Wei-Hong¹, ZHAO Rui-Feng¹, GE Hong-Tao²

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

2 Xinjiang Geomatics Center, Urumqi 830002, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1911 ~ 1922.

Abstract: Soil respiration is one of the ecosystem processes most sensitive to climate change, but is less studied in desert ecosystems. The spatial and temporal changes in soil surface CO_2 efflux, the major CO_2 source to the atmosphere from terrestrial ecosystems, directly influence the local and regional carbon budgets. In this study, we measured soil respiration and associated biophysical factors by using an automated CO_2 efflux system (LI-COR 8100), and examined the effects of soil temperature and moisture on the rate of soil respiration for three desert communities (*H. ammodendron*, *H. caspica* and *A. aphylla*) at high (B) and low (A) coverage. It was found that soil respiration rate showed obvious diurnal and seasonal patterns during the growing season of plants, which were consistent across different communities and under different coverage. In the daytime, the maximum rate of soil respiration occurred between 12:00–14:00, the minimum around

基金项目:中国科学院重要方向资助项目(KZCX2-YW-127);国家自然科学基金资助项目(40671014);国家支撑资助项目(2006BAC01A03)

收稿日期:2007-02-01; **修订日期:**2007-08-23

作者简介:张丽华(1980~),女,新疆哈密人,博士生,主要从事干旱区生态学研究. E-mail: zhangzhuang80@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the importance directional project of the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-127), National Natural Science Foundation of China (No. 40671014) and National Science and Technology Support Plan (No. 2006BAC01A03)

Received date: 2007-02-01; **Accepted date:** 2007-08-23

Biography: ZHANG Li-Hua, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecology of arid region. E-mail: zhangzhuang80@126.com

8:00 or 20:00. The soil respiration rate was high in the summer (June, July and August), followed by the fall (September and October) and the spring (May). The difference in daily mean soil respiration between *H. ammodendron* B site and other community types and sites was significant from May through to October. The soil respiration correlated positively with soil surface temperature, with the degree of correlations apparently differing among the six sites. There were significant and negative correlations between soil respiration and soil moisture in *H. ammodendron* B and *H. caspica* B sites, which represented the driest and wettest sites, respectively. A multi-variable model about soil surface temperature and soil moisture could explain 61.9% of temporal variation in soil CO₂ efflux at a larger scale. The Q_{10} values for *H. ammodendron* A、B, *H. caspica* A、B and *A. aphylla* A、B sites were 1.3、1.34、1.58、1.65、1.31 and 1.17, respectively, with an average of 1.39.

Key Words: desert ecosystem; soil respiration; temperature; soil moisture; Q_{10}

工业革命以来,由于人类活动的影响,大气中 CO₂等温室气体的浓度持续上升,全球气候将因此而发生巨大的变化。土壤呼吸是大气 CO₂的重要排放源,其排放量是陆地生态系统向大气排放碳的最大通量之一^[1]。据估计,全球陆地生态系统由土壤呼吸每年释放到大气的碳通量达到(68 ± 4) PgC ~ 100 PgC^[2,3],约为化石燃料碳排放量的 11 倍^[4],仅次于全球陆地总初级生产力(GPP)的估算值 100 ~ 120 PgC/a^[3]。干旱、半干旱区占据了地球表面的五分之二多^[5],土壤呼吸也是干旱、半干旱土壤碳损失的主要过程之一^[6],并且因为相对较少的土壤有机碳含量,土壤呼吸是对气候变化最敏感的一个生态系统特征^[7]。然而,与其他生态系统相比,在干旱、半干旱区开展的这方面研究相对较少^[2]。

土壤 CO₂释放具有很大空间变异而难以估算^[8,9]。土壤温度和土壤湿度能解释土壤呼吸的大部分变异,但植被类型、土壤肥力和土壤质地等因素也能对土壤呼吸空间变异起到重要作用^[10]。尤其在干旱、半干旱生态系统,植被、土壤特性的斑块状分布增加了土壤 CO₂释放的空间变异性^[11]。同时,植被覆盖通过改变辐射特征、植物的蒸腾作用等影响土壤温度和湿度^[12]。Conant 等研究得出植被冠幅盖度强烈影响沿温度、降水梯度分布的灌木草原、林地等半干旱生态系统的碳库大小和通量^[13]。Maestre 等发现地中海半干旱草原植被和土壤表面特征的小尺度空间变异对土壤呼吸速率的影响显著^[11]。然而,在干旱区不同覆盖度的荒漠植物群落对土壤呼吸速率的影响鲜见报道。

本文以准噶尔盆地梭梭、盐穗木和假木贼 3 个典型荒漠植物群落为对象,通过对生长季(2005 年 5 ~ 10 月)土壤呼吸速率、土壤温度、湿度的监测和土壤理化性质的调查,分析不同植物群落及群落盖度间土壤呼吸速率的差异,探讨土壤温度、湿度对土壤呼吸速率时间、空间格局的影响,探寻土壤养分、盐分对群落间土壤呼吸速率差异的作用,通过认识荒漠生态系统土壤呼吸的基本特征为其碳循环研究提供科学依据。

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,西南部海拔高程在 273 ~ 280 m 之间,东北部海拔高程在 258 ~ 260 m 之间。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)^[14]。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℃,年平均降水量 105.3 mm,冬季无稳定积雪,年平均蒸发量达 3545 mm,约为年降水量的 34 倍,春夏季多大风。

选择典型荒漠群落—梭梭、盐穗木和假木贼,并在每一群落内根据盖度高低分别建立 B、A 两块样地,大小为 30 m × 30 m。梭梭群落内以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为优势种,林下分布较多的白刺(*Nitraria sibirica* Pall)、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。其中,梭梭 A 样地(N 45°23.972', E 84°51.274')的植被分层现象不明显,高度可达 60 ~ 80 cm,盖度 20%;在梭梭 B 样地(N 45°24.669', E 84°

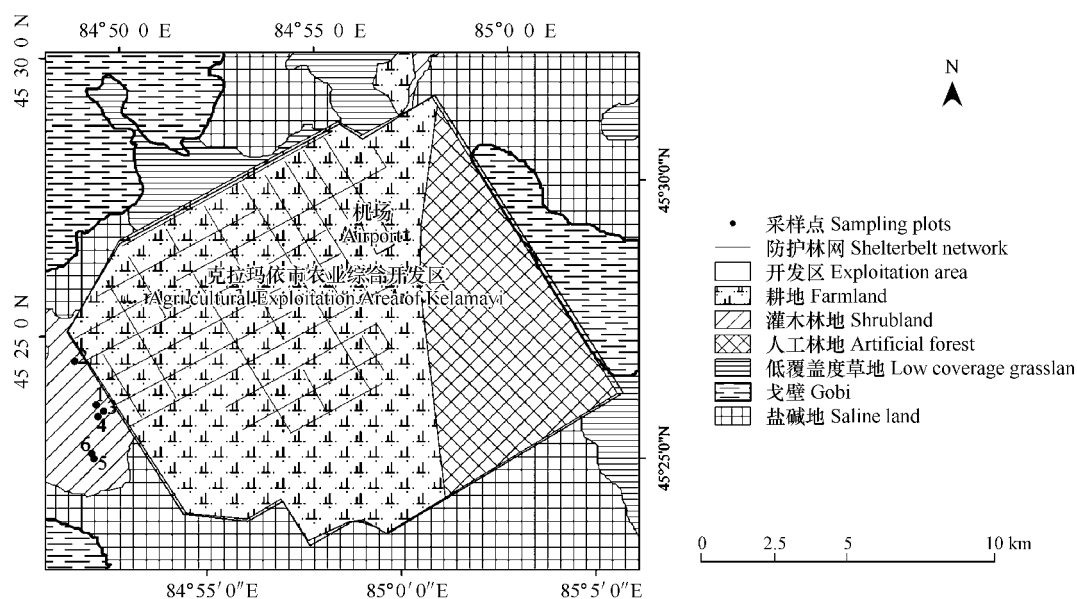


图1 研究区位置 and 不同群落类型及盖度级别的样地分布图

Fig. 1 Location of study area and sample scheme of different communities and coverage types

1. 梭梭 A *H. ammodendron* (A); 2. 梭梭 B *H. ammodendron* (B); 3. 假木贼 A *A. aphylla* (A); 4. 假木贼 B *A. aphylla* (B); 5. 盐穗木 A *H. caspica* (A); 6. 盐穗木 (B) *H. caspica* (B)

50.489'), 梭梭高 1~2.5 m 之间, 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。盐穗木群落以盐穗木 (*Halostachys caspica*)、琵琶柴 (*Reaumuria soongorica*)、白刺 (*Nitraria sibirica* Pall) 等为主, 还分布有盐节木 (*Halocnerrum strobilaceum*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、无叶假木贼 (*Anabasis aphylla*)、补血草 (*Limonium suffruticosum*)、猪毛菜 (*Salsola foliosa*) 等。盐穗木 A 样地 (N 45°22.999', E 84°51.505'), 植被高度约 30~45 cm, 盖度为 15%; 盐穗木 B 样地 (N 45°23.080', E 84°51.412'), 高度达 70~85 cm, 盖度为 25%。假木贼群落, 以无叶假木贼 (*Anabasis aphylla*) 为建群种, 还分布有少量白刺 (*Nitraria sibirica* Pall)、小獐毛 (*Aeluropus pungens*) 等, 其中假木贼 A 样地 (N 45°23.874', E 84°51.468'), 高度在 20~30 cm 之间, 盖度约 5%; 假木贼 B 样地 (N 45°23.849', E 84°51.431'), 高度达 50~70 cm, 盖度约 20%。

2 研究方法与数据采集

土壤呼吸速率测定采用开路式土壤碳通量测量系统, 测定仪器型号为 LI-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA)。LI-8100 利用测量室内 CO₂ 浓度的增加速率推算测量室外土壤 CO₂ 扩散到空气中的速度。为了保证推算结果的正确, 测量室内外的浓度梯度、气压、土壤温湿度应该相似。通过估算测量室关闭后 CO₂ 浓度增加的原初速率来解决测量室内外的土壤表层与空气间的 CO₂ 浓度梯度并不完全一样的问题^[15]。

每个样地内设置 5 个重复, 每个重复间隔 20 m。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。

实验观测频度为, 2005 年 5~10 月, 每月 20 日左右在每个样地测定 1 d。日观测频度为每间隔 2 h 测定 1 次, 分别在每个测定日的 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 和 20:00 (北京时间) 进行。在测定呼吸速率的同时, 使用数字显示温度计 (型号: WMY-01C) 测定了气温和 0~50 cm (5 cm 间隔) 的土壤温度, 采用烘干法测定了 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 的土壤含水量。同时分层密封土样一份, 带回实验室测定土壤养分、盐分含量。

3 结果与分析

3.1 温度对土壤呼吸速率的影响

5~10月,各群落的土壤呼吸速率都表现出明显的日变化格局,最高值出现在12:00~14:00,最低值在8:00或20:00,并与地表温度的变化存在较高的一致性(图2)。除个别观测日当天的阴雨天气影响土壤CO₂释放速率外,各样地土壤呼吸速率表现出从5月到7月逐渐增加,8~10月降低的变化趋势。总体上,夏季各月(6、7、8月)土壤呼吸速率高于秋季月份(9、10月),春季(5月)最低。同时,土壤呼吸速率与温度变化也存在不完全协调的现象,如10月的温度在实验期间最低,但土壤呼吸速率未达到最低值,普遍高于5月。方差分析表明,生长季样地间日平均土壤呼吸速率仅在梭梭B与其他样地间存在显著差异($P < 0.05$)。

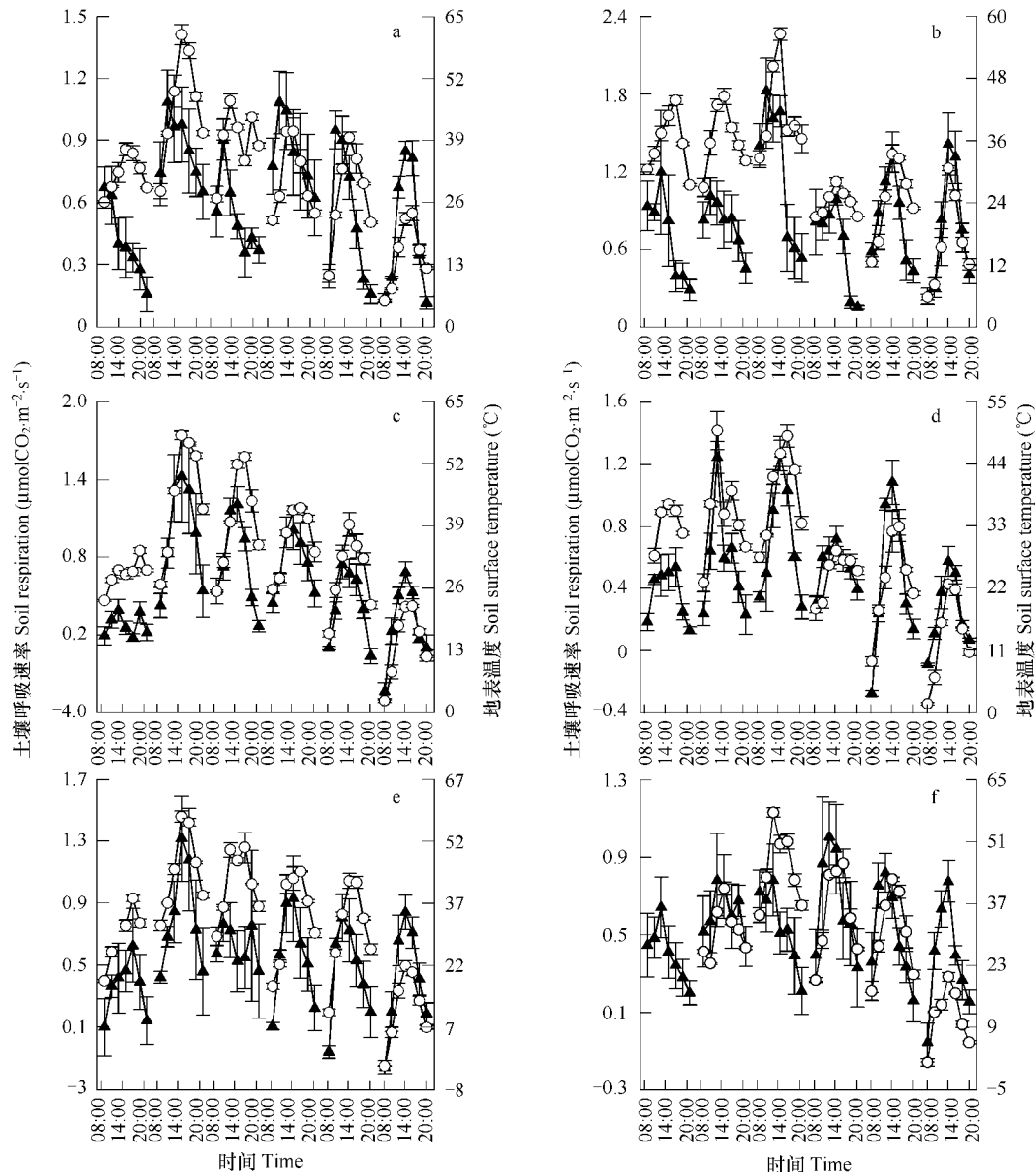


图2 梭梭A、B,盐穗木A、B和假木贼A、B样地(依次用a、b、c、d、e、f)土壤呼吸速率(实心图标)和地表温度(空心图标)5~10月(从左至右)的日变化

Fig. 2 Daytime changes of soil respiration (solid symbols) and soil surface temperature (open symbols) in *H. ammodendron* (A, B), *H. caspica* (A, B) and *A. aphylla* (A, B) sites from May to October (a, b, c, d, e, f represent the six sites respectively)

运用线性和指数模型对6个样地生长季的土壤呼吸速率与近地面气温、地表温度和5、10、20、30、40、50

cm 土壤温度间的关系进行曲线拟和,采用 R^2 作为模型的变异解释量,结果见表 2、3。土壤呼吸速率对地表温度和近地面气温的响应明显高于土壤温度,温度对土壤呼吸的贡献随土壤深度的递增而递减。在梭梭 A 样地,地表温度和近地面气温能解释土壤呼吸速率时间变异的 33%、32%,在梭梭 B 样地,则分别解释 31%、28% 的时间变异。盐穗木 A 样地,地表温度和近地面气温通过线性模型可分别解释 74%、60% 的土壤呼吸时间变异,剔除负值后经由指数模型解释量分别下降为 54%、44%;同样,在盐穗木 B 样地,地表温度和近地面气温的解释量由线性模型的 66%、52% 分别下降为 59% 和 46%。在假木贼 A 样地,地表温度和近地面气温对土壤呼吸时间变异的解释量 56%、43% (线性模型) 变为 42%、29% (剔除负值后由指数模型得出),假木贼 B 样地也有所变化,解释量由 32%、22% 下降为 22%、13%。

表 1 梭梭、盐穗木和假木贼群落生长季平均土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 Mean soil respiration rates of *H. ammodendron*, *H. caspica* and *A. aphylla* communities in growing season

盖度 Coverage	梭梭 <i>H. ammodendron</i>	盐穗木 <i>H. caspica</i>	假木贼 <i>A. aphylla</i>
低 Low (A)	0.606 (0.196)	0.583 (0.291)	0.537 (0.164)
高 High (B)	0.817 (0.194)	0.481 (0.162)	0.518 (0.118)

括号内数字代表标准差 ($n=6$) The values in brackets are standard deviation

由表 2 可见, Q_{10} 值随土壤深度 (5 ~ 50 cm) 增加而增大, 即随深层土壤温度的波动减小而增加。指数模型计算的 Q_{10} 值略低于线性模型。通过指数模型, 由地表温度计算出梭梭 A、B, 盐穗木 A、B 和假木贼 A、B 样地的 Q_{10} 值分别为 1.3、1.34、1.58、1.65、1.31 和 1.17, 平均值 1.39, 变异系数为 13.21%。各样地 Q_{10} 值 (由地表温度计算) 与地表温度呈负相关, 但不显著 ($r = -0.348, n=6, P=0.500$)。

表 2 梭梭、盐穗木和假木贼群落土壤呼吸速率与温度间的回归方程、变异解释量和 Q_{10} 值

Table 2 Models, amounts of variation explained and Q_{10} values of soil respiration for temperature from *H. ammodendron*, *H. caspica* and *A. aphylla* communities

样地 Site	温度 Temperature	回归方程 Regression equation	Q_{10}	F	R^2
梭梭 (A) <i>H. ammodendron</i> (A)	T_{NSAT}^*	$Y = 0.187e^{0.042X}$	1.52	14.9	0.317
	$T_{0 \text{ cm}}$	$Y = 0.242e^{0.026X}$	1.30	15.7	0.329
	$T_{5 \text{ cm}}$	$Y = 0.306e^{0.024X}$	1.27	4.2	0.117
	$T_{10 \text{ cm}}$	$Y = 0.111X^{0.528}$	1.34	4.4	0.121
	$T_{20 \text{ cm}}$	$Y = 0.272e^{0.034X}$	1.40	4.4	0.122
	$T_{30 \text{ cm}}$	$Y = 0.234e^{0.041X}$	1.51	5.7	0.152
	$T_{40 \text{ cm}}$	$Y = 0.206e^{0.048X}$	1.62	6.5	0.168
	$T_{50 \text{ cm}}$	$Y = 0.182e^{0.054X}$	1.72	6.6	0.172
梭梭 (B) <i>H. ammodendron</i> (B)	T_{NSAT}	$Y = 0.297e^{0.036X}$	1.43	12.3	0.278
	$T_{0 \text{ cm}}$	$Y = 0.326e^{0.029X}$	1.34	14.6	0.313
	$T_{5 \text{ cm}}$	未通过 F 检验 Not pass F test			
	$T_{10 \text{ cm}}$	未通过 F 检验 Not pass F test			
	$T_{20 \text{ cm}}$	未通过 F 检验 Not pass F test			
	$T_{30 \text{ cm}}$	$Y = 1.973 + 0.04X^2 - 0.152X$	2.80	3.3	0.174
	$T_{40 \text{ cm}}$	$Y = 2.236 + 0.005X^2 - 0.183X$	1.40	3.5	0.185
	$T_{50 \text{ cm}}$	未通过 F 检验 Not pass F test			
盐穗木 (A) <i>H. caspica</i> (A)	T_{NSAT}	$Y = 0.036X - 0.341$	1.72	48.4	0.602
	$T_{0 \text{ cm}}$	$Y = 0.025X - 0.171$	2.96	92.3	0.742
	$T_{5 \text{ cm}}$	$Y = 0.027X - 0.037$	1.85	19	0.372
	$T_{10 \text{ cm}}$	$Y = 0.03X - 0.029$	1.69	11.8	0.27

续表

样地 Site	温度 Temperature	回归方程 Regression equation	Q_{10}	F	R^2
盐穗木(B) <i>H. caspica</i> (B)	$T_{20\text{ cm}}$	$Y = 0.038X - 0.158$	2.17	11.8	0.27
	$T_{30\text{ cm}}$	$Y = 0.041X - 0.232$	2.50	12.4	0.286
	$T_{40\text{ cm}}$	$Y = 0.045X - 0.308$	2.96	13.3	0.300
	$T_{50\text{ cm}}$	$Y = 0.047X - 0.361$	3.56	9.7	0.316
	T_{NSAT}	$Y = 0.029X - 0.193$	2.87	34.0	0.515
	$T_0\text{ cm}$	$Y = 0.025X - 0.151$	2.62	61.3	0.657
	$T_5\text{ cm}$	$Y = 0.025X - 0.031$	1.84	17.1	0.349
	$T_{10\text{ cm}}$	$Y = 0.024X + 0.012$	1.72	9.8	0.234
	$T_{20\text{ cm}}$	$Y = 0.028X - 0.051$	1.89	8.5	0.210
	$T_{30\text{ cm}}$	$Y = 0.032X - 0.138$	2.20	9.5	0.228
	$T_{40\text{ cm}}$	$Y = 0.035X - 0.196$	2.48	9.5	0.229
	$T_{50\text{ cm}}$	$Y = 0.038X - 0.248$	2.81	5.6	0.197
假木贼(A) <i>A. aphylla</i> (A)	T_{NSAT}	$Y = 0.019X + 0.086$	1.55	23.3	0.429
	$T_0\text{ cm}$	$Y = 0.016X + 0.072$	1.55	39.3	0.559
	$T_5\text{ cm}$	$Y = 0.015X + 0.201$	1.36	10.5	0.252
	$T_{10\text{ cm}}$	$Y = 0.016X + 0.232$	1.35	6.5	0.173
	$T_{20\text{ cm}}$	$Y = 0.018X + 0.206$	1.39	5.3	0.146
	$T_{30\text{ cm}}$	$Y = 0.021X + 0.149$	1.48	5.3	0.146
	$T_{40\text{ cm}}$	$Y = 0.024X + 0.085$	1.58	5.3	0.145
	$T_{50\text{ cm}}$	$Y = 0.033X - 0.071$	1.92	4.3	0.147
假木贼(B) <i>A. aphylla</i> (B)	T_{NSAT}	$Y = 0.012X + 0.261$	1.28	8.6	0.222
	$T_0\text{ cm}$	$Y = 0.010X + 0.258$	1.25	13.9	0.316
	$T_5\text{ cm}$	$Y = 0.008X + 0.362$	1.17	3.7	0.110
	$T_{10\text{ cm}}$	未通过 F 检验 not pass F test			
	$T_{20\text{ cm}}$	未通过 F 检验 not pass F test			
	$T_{30\text{ cm}}$	$Y = 0.014X + 0.264$	1.30	4.1	0.121
	$T_{40\text{ cm}}$	$Y = 0.017X + 0.2$	1.39	4.6	0.133
	$T_{50\text{ cm}}$	$Y = 0.026X + 0.052$	1.64	4.7	0.165

* T_{NSAT} : 近地面气温 Near surface air temperature, 下同 the same below表 3 剔除负值后盐穗木和假木贼群落土壤呼吸速率与温度间的指数模型、变异解释量和 Q_{10} Table 3 Exponential models, amounts of variation explained and Q_{10} values of soil respiration for temperature from *H. caspica* and *A. aphylla* communities after eliminating negative values

样地 Site	温度 Temperature	回归方程 Regression equation	Q_{10}	F	R^2
盐穗木 A	T_{NSAT}	$Y = 0.074e^{0.071X}$	2.03	24.5	0.441
<i>H. caspica</i> (A)	$T_0\text{ cm}$	$Y = 0.112e^{0.046X}$	1.58	36.8	0.543
盐穗木 B	T_{NSAT}	$Y = 0.095e^{0.061X}$	1.84	25.3	0.457
<i>H. caspica</i> (B)	$T_0\text{ cm}$	$Y = 0.110e^{0.050X}$	1.65	42.5	0.586
假木贼 A	T_{NSAT}	$Y = 0.235e^{0.030X}$	1.35	11.8	0.290
<i>A. aphylla</i> (A)	$T_0\text{ cm}$	$Y = 0.220e^{0.027X}$	1.31	21.2	0.423
假木贼 B	T_{NSAT}	$Y = 0.346e^{0.017X}$	1.19	4.1	0.125
<i>A. aphylla</i> (B)	$T_0\text{ cm}$	$Y = 0.331e^{0.016X}$	1.17	8.1	0.218

3.2 土壤湿度对土壤呼吸速率的影响

通过每个样地 5~10 月份土壤湿度与日平均土壤呼吸速率间的相关性分析,得出:梭梭 B 样地土壤呼吸速率与 30~50 cm 土壤湿度间呈显著负相关($r = -0.631$, $n = 16$, $P = 0.021$);在盐穗木 B 样地,与 0~5 cm、15~30 cm 土壤湿度间呈显著、极显著负相关($r = -0.597$ 、 -0.650 , $P = 0.011$ 、 0.005 , $n = 17$)。在其他样地土壤湿度与呼吸速率未表现出显著相关性。实验期间,梭梭 B 样地 30~50 cm 土壤湿度在 5.39%~13.35% 间波动,低于其他各样地,变幅亦最小。盐穗木 B 样地 0~5 cm、15~30 cm 土壤湿度在各样地都达到最大值,变幅较大,分别为 5.23%~27.40%、17.35%~28.22%。盐穗木 B 样地的地势较低,土壤湿度较高;在梭梭 B 样地,因植被盖度较大,植物生长状况良好,土壤湿度降低^[16]。梭梭 B、盐穗木 B 样地土壤呼吸速率与土壤湿度间的拟和关系见图 3。

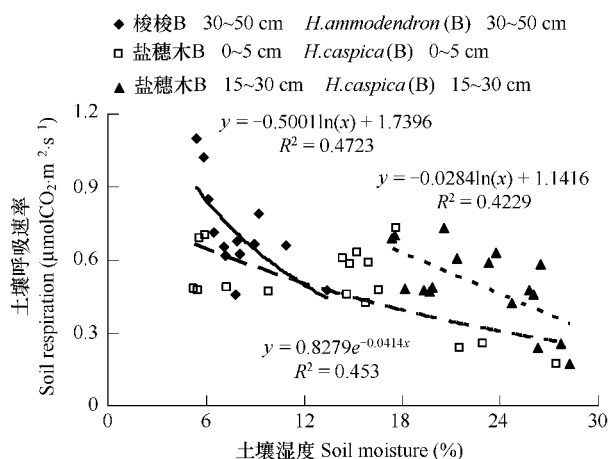


图3 梭梭 B、盐穗木 B 样地土壤呼吸速率与土壤湿度

Fig. 3 Regression between soil respiration and soil water content in sites of *H. ammodendron* B and *H. caspica* B

由样地土壤呼吸速率、地表温度、土壤湿度的季节变化(图 4)可见,在大多数样地土壤呼吸速率季节变化与地表温度同步,土壤呼吸速率最大值的出现时间与地表温度一致(6、7 月),此时土壤湿度并未达到实验期间的最低或最高值。

5~10 月份样地间平均土壤呼吸速率、地表温度和土壤湿度的差异见图 5。相关性分析表明,土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著负相关,即与 5~15 cm、15~30 cm 和 30~50 cm 土壤湿度间的相关性分别为 $r = -0.836$ 、 -0.820 、 -0.910 , $p = 0.038$ 、 0.046 、 0.012 ($n = 6$);土壤呼吸速率与地表温度间的相关性不显著($P > 0.1$),可见土壤湿度对样地间土壤呼吸速率差异的影响更大。各样地 Q_{10} 值(由地表温度计算)与实验期间各层土壤平均湿度呈正相关,但不显著($P > 0.1$)。

3.3 温度、土壤湿度对土壤呼吸速率的协同作用

以 6 个样地各层土壤湿度和地表温度、近地面气温为变量,采用多元线性回归中的逐步回归(Stepwise)方法,分析 6~10 月份土壤呼吸速率与上述变量的关系,变量的显著水平设为 0.05,结果见表 4。另对土壤呼吸速率与地表温度、0~5 cm 和 30~50 cm 土壤湿度分别进行回归分析,得出温度-土壤湿度的多变量模型在更大空间尺度能解释荒漠土壤呼吸速率时间变化的 61.9%,优于单变量模型(表 4)。

表 4 土壤呼吸速率与温度、土壤湿度及其协同作用的变异解释量、 F 值和回归方程

Table 4 Amount of variation explained, F -values and regression equations relating soil respiration rates (Y) at six sites with different independent variables

变量 Variable	R^2	F	回归方程 Regression equation
$T_{0\text{ cm}}$	0.488	26.650	$Y = 0.578T_{0\text{ cm}}^{0.085}$
$H_{0\sim5\text{ cm}}$	0.257	9.701	$Y = 0.829e^{-0.034W}$
$H_{30\sim50\text{ cm}}$	0.305	12.301	$Y = 0.423 + 3.167/W$
$T-H$	0.619	14.082	$Y = 0.324 + 0.015T_0 - 0.019W_{30\sim50} + 0.020W_{0\sim5}$

$T_{0\text{ cm}}$: 温度 Temperature at 0 cm; $H_{0\sim5\text{ cm}}$: 土壤湿度 Soil moisture at 0~5 cm depth; $H_{30\sim50\text{ cm}}$: 土壤湿度 Soil moisture at 30~50 cm depth; $T-H$: 温度-土壤湿度 Temperature-soil moisture

3.4 土壤呼吸速率与土壤养分、盐分间的关系

各样地土壤呼吸速率与 0~50 cm 土层加权平均的土壤 pH 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和速效 K 含量呈显著正相关,与 SO_4^{2-} 离子呈显著负相关性,而同 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 等离子表现出负相关趋势,但不显著。土壤呼吸速率与

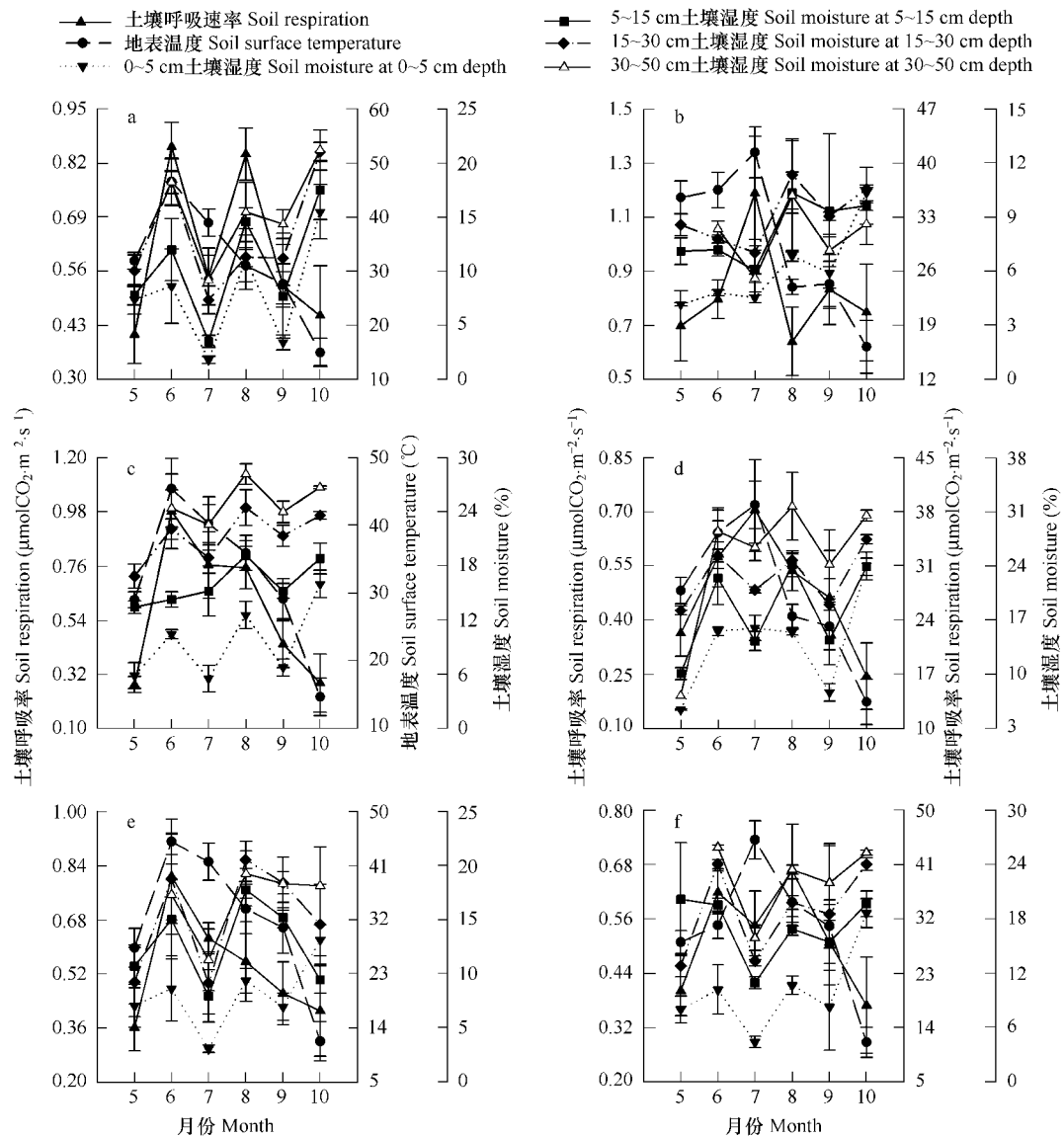


图4 梭梭A、B,盐穗木A、B,假木贼A、B样地(依次用a、b、c、d、e、f)土壤呼吸速率、地表温度和土壤湿度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of soil respiration, soil surface temperature and soil moisture at *H. ammodendron* A,B, *H. caspica* A,B and *A. aphylla* A, B sites (a, b, c, d, e, f represent the six sites respectively)

有机质、有机碳、总盐及全盐之间未得出相关关系(表5),可能是各样地间土壤有机质等差别较小。

4 讨论

实验期间各样地土壤呼吸速率时间变化对地表温度和近地面气温的响应明显高于土壤温度,与齐玉春^[17]、张金霞^[18]、Osozawa^[19]等人对半干旱草地的研究结果相似。荒漠土壤微生物的数量和活性随表土层温度的变化而变化,有机物质的矿化也随之波动,土壤CO₂释放主要是地表的贡献作用。同时,荒漠植被分布稀疏,植株相对低矮,地表温度受环境影响大,加之准噶尔盆地位于北半球中纬度,气温年、日较差大,因此该区域荒漠土壤CO₂释放速率随温度波动的振幅较大。

本文得出在大多数样地土壤呼吸速率季节变化与地表温度同步,呼吸速率最大值的出现时间与地表温度一致,此时土壤湿度并未达到实验期间的最低或最高值(图4)。不同于温度高、土壤湿度低造成科罗拉多高原冷荒漠(cold desert)夏季的低土壤呼吸速率,在温度和湿度条件适宜的春季土壤呼吸速率达到最高值^[20];也不同于地中海半干旱草地土壤CO₂释放的季节动态明显反映了土壤湿度的变化^[11]。但与Piñol^[21],Casals

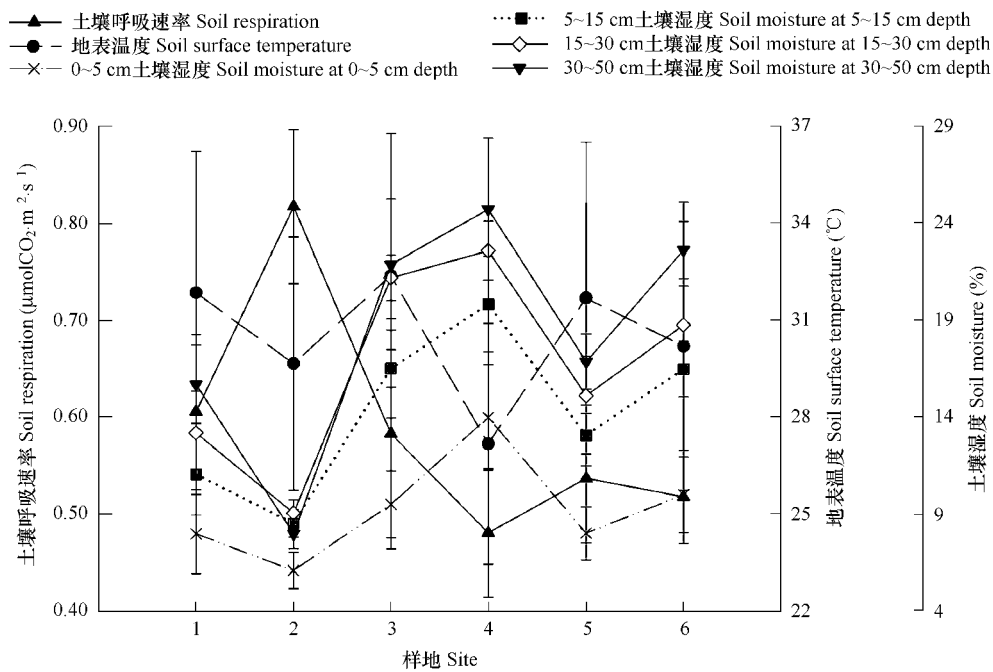


图5 各样地生长季平均土壤呼吸速率、地表温度和土壤湿度

Fig. 5 Mean soil respiration, soil surface temperature and soil moisture in growing season for six sites

1 梭梭 A *H. ammodendron* (A), 2 梭梭 B *H. ammodendron* (B), 3 盐穗木 A *H. caspica* (A), 4 盐穗木 B *H. caspica* (B), 5 假木贼 A *A. aphylla* (A), 6 假木贼 B *A. aphylla* (B)

等^[22], Frank^[23]对地中海半干旱森林土壤和温带半干旱草地的研究报道一致。夏季,较高土壤温度(30℃左右)下根系生长活跃促进了根系呼吸,同时微生物活性较高促进了有机质转化从而增加微生物呼吸,因而产生了较高的土壤呼吸速率^[24]。同时,在干燥条件下,根系相对于枝条能更好地维持细胞组织膨胀,因此逐渐变成植物体可溶性碳水化合物的首选汇(sink)^[25]。当土壤含水量较低,植物冠层开始承受水分压力时,分配到根系生长的可溶性碳水化合物比例增加,导致了较高的根系呼吸^[22]。

表5 土壤性质及其与土壤呼吸速率间的相关性

Table 5 Summary statistics of soil properties and coefficients of correlation among themselves and between them and soil CO₂ efflux for the six sites

项目 Item	pH	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	速效 K Available K
平均值 Mean	8.399	0.014	0.254	1.468	0.322	0.105	1.306	148.667
标准差 Standard deviation	0.379	0.028	0.142	0.740	0.212	0.087	0.767	45.627
pH	1							
CO ₃ ²⁻	0.936 **	1						
HCO ₃ ⁻	0.964 **	0.975 **	1					
SO ₄ ²⁻	-0.919 **	-0.850 *	-0.890 *	1				
Ca ²⁺	-0.896 *	-0.759	-0.818 *	0.970 **	1			
Mg ²⁺	-0.816 *	-0.616	-0.753	0.848 *	0.912 *	1		
Na ⁺	-0.665	-0.478	-0.660	0.682	0.703	0.907 *	1	
速效 K Available K	0.865 *	0.983 **	-0.950 **	-0.770	-0.646	-0.517	-0.427	1
6 月 June	0.192	0.114	0.015	-0.112	-0.119	0.112	0.237	0.017
7 月 July	0.766	0.900 **	0.797	-0.623	-0.547	-0.326	-0.093	0.894 *
8 月 August	0.317	0.002	0.085	-0.344	-0.476	-0.491	-0.409	-0.164
9 月 September	0.940 **	0.991 **	0.993 **	-0.863 *	-0.771	-0.674	-0.577	0.980 **
10 月 October	0.879 *	0.930 **	0.934 **	-0.826 *	-0.693	-0.589	-0.578	0.927 **
6~10 月均值 June-October Mean flux	0.913 *	0.914 *	0.865 *	-0.806	-0.740	-0.540	-0.372	0.851 *

各样地土壤呼吸速率时间变化对温度的响应程度不同,在 3 个样地地表温度对土壤呼吸速率的解释量大于 50%。同时,仅在土壤湿度最低和最高的高盖度梭梭和盐穗木样地得出土壤呼吸速率与土壤湿度间存在显著的负相关性(图 3)。由于土壤温度和湿度是半干旱生态系统中土壤呼吸的主要驱动因子,两者的相对重要性存在争议^[22,23,26]。Conant 认为土壤湿度对土壤呼吸速率的影响在干旱、半干旱生态系统应尤其显著,他得出土壤湿度是影响亚利桑那州 3 种半干旱生态系统类型土壤 CO₂ 释放的主要因素^[6]。在中国温带半干旱草地土壤湿度是土壤呼吸强度的主要制约因子^[27]。然而,Wildung 研究得出春末和夏季土壤湿度是干旱草地土壤呼吸速率的限制因子,在早春和秋冬季节温度是限制因子,进而指出温度和土壤湿度相互依赖,共同影响土壤呼吸^[26]。本文也得出温度-土壤湿度的多变量模型在更大空间尺度能解释荒漠土壤呼吸速率时间变化的 61.9%,优于单变量模型(表 4)。研究表明,只有土壤含水量达到土壤微生物永久性萎蔫点或超过了田间持水力的情况下,土壤呼吸速率才会明显地受到土壤水分的影响,如果水分的变化没有超出极端范围,并不足以影响微生物和植物根系的活动,则很难明显地测出水分对土壤呼吸的影响,此时土壤水分的影响很可能被其他因子的影响所掩盖^[28,29]。在单一样地和 6 个样地整体的不同空间尺度,温度、土壤水分对土壤呼吸速率的影响存在差异,其影响规律与机理仍需要深入研究。因此,关于荒漠生态系统温度、土壤湿度对土壤呼吸速率的影响规律与机理研究仍需要进行长期的定位观测。

各群落土壤呼吸的平均 Q_{10} 值为 1.39,略低于全球尺度(不包括湿地)基于气温产生的 Q_{10} 值(1.5)^[30]。亚热带杉木人工林得出 Q_{10} 值为 2.42^[31],温带草原群落在 1.47 ~ 1.84 之间^[32],热带橡胶林为 2.18^[33],文献报道的 Q_{10} 值在一定范围内波动,其部分原因可能是温度测量的深度不同^[34]。本文也发现 Q_{10} 值随土壤深度增加而增大的现象(表 2)。Borken 提出测量土壤温度的合适深度是对土壤呼吸速率解释量较高的温度层,并推论在土壤剖面中该深度产生的 CO₂ 量最大^[35]。地表温度对荒漠土壤呼吸速率的解释量最高,但土壤剖面中 CO₂ 产生量最大的深度范围尚待研究。同时, Q_{10} 值的差异还受到土壤湿度等因素影响。本文各样地 Q_{10} 值(由地表温度计算)与土壤含水量呈正相关,虽不显著($P > 0.1$),但仍可以反映出干旱条件下 Q_{10} 值对土壤湿度存在一定的依赖性^[36]。比较不同研究中 Q_{10} 值的困难还在于,同一组数据使用不同模型计算出的 Q_{10} 值不同^[37],文中亦得出指数模型计算的 Q_{10} 值低于线性模型的结果。

生长季梭梭 B 样地日平均土壤呼吸速率与梭梭 A、盐穗木 A、B 和假木贼 A、B 样地间存在显著差异($P < 0.05$)。各样地土壤呼吸速率与有机质、有机碳、总盐及全盐之间未得出相关关系(表 5),呼吸速率与地表温度间的相关性不显著($P > 0.1$),但与 5 ~ 15cm、15 ~ 30cm 和 30 ~ 50cm 土壤湿度呈显著负相关。陈全胜等研究得到水分供应状况和退化程度不同的温带草原植物群落间土壤呼吸差异显著^[32]。祁连山亚高山灌丛林土壤呼吸的空间变异主要受温度、水分和植物根系的综合影响^[38]。土壤湿度和温度的差异对地中海半干旱草原土壤呼吸速率小尺度空间变异的解释量高于土壤有机质、根系密度^[11]。在荒漠环境中,植物体对温度的调节作用较小,导致环境温度本身的差异不大;而在地形、土壤特性、植物生长等影响下土壤湿度具有较高的时空变异。Raich & Tufekcioglu 提出土壤呼吸主要受气候因素控制,植被起到次要影响作用,植物群落间土壤呼吸的差异归因于植物调节引起土壤微气候环境的不同^[39]。各样地土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著负相关,在梭梭 B 样地,梭梭高 2 ~ 3 m,群落分层明显,盖度达 50%,土壤湿度低于其他样地,土壤湿度对样地间土壤呼吸速率的差异可能具有较高的解释量。

References:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the 14 global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7—20.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus SerB*, 1992, 44: 81—99.
- [3] Musselman R C, Fox D G. A review of the role of temperate forest in the global CO₂ balance. *J Air Waste Manage Assoc*, 1991, 41: 798—807.
- [4] Marland G, Boden T A, Andres R J, *et al.* Global regional and national CO₂ emissions. in: trends a compendium of data on global change carbon dioxide information analysis center. Oak Ridge: Oak Ridge national laboratory, US department of energy, 2000.

- [5] Reynolds J F. Desertification. In: Levin, S. A., ed., *Encyclopedia of Biodiversity*, vol 2. San Diego: Academic Press, 2001. 61 — 78
- [6] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 383 — 390.
- [7] West N E, Stark J M, Johnson D W, *et al.* Effects of climatic change on the edaphic features of arid and semiarid lands of western North America. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1994, 8: 307 — 351.
- [8] Fang C, Moncrief J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant Soil*, 1998, 205: 135 — 146.
- [9] Xu M, Qi Y. Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667 — 677.
- [10] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8: 1205 — 1216.
- [11] 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.
- [12] Palmroth S, Maier C A, McCarthy H R, *et al.* Contrasting response to drought of forest floor CO₂ efflux in a Loblolly pine plantation and a nearby Oak-Hickory forest. *Global Change Biology*, 2005, 11: 421 — 434.
- [13] Conant R T, Klopatek J M, Malin R C, *et al.* Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona. *Biogeochemistry*, 1998, 43: 43 — 61.
- [14] Qian Y B, Zhou H R, Xu M, *et al.* Relationship between water-soil properties and desert plant diversities in agricultural development area of Kelamayi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 186 — 189.
- [15] Zhao G D, Wang B, Yang J, *et al.* LI-8100 automated soil CO₂ flux system and its application. *Meteorological Science and Technology*, 2005, 33(4): 363 — 366.
- [16] Chang X X, Zhao A F, Zhao W Z, *et al.* Status of soil moisture in oasis and desert unirrigated vegetation region along middle reaches of Heihe River basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 126 — 129.
- [17] Qi Y C, Dong Y S, Liu J Y, *et al.* Daily variation characteristics of CO₂ emission fluxes and contributions of environmental factors in semiarid grassland of Inner Mongolia, China. *Science in China, Series D*, 2005, 35(6): 493 — 500.
- [18] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, *et al.* Carbon dioxide emission from Mat cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 38(1): 32 — 40.
- [19] Osozawa S, Hasegawa S. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an arid soil. *Soil Sci*, 1995, 160(2): 117 — 124
- [20] Fernandez D P, Neff J C, Belnap J, *et al.* Soil respiration in the cold desert environment of the Colorado Plateau (USA): abiotic regulators and thresholds. *Biogeochemistry*, 2006, 78: 247 — 265
- [21] Piñol J, Alcañiz J M, Rodà F. Carbon dioxide efflux and pCO₂ in soils of three *Quercus ilex* montane forests. *Biogeochemistry*, 1995, 30: 191 — 215.
- [22] Casals P, Romanya J, Cortina J, *et al.* CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 261 — 281.
- [23] Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1235 — 1241
- [24] Lou Y S, Li Z P, Zhang T L. Carbon dioxide flux in a subtropical agricultural soil of china. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, 149: 281 — 293.
- [25] Huck M G, Hillel D. A model of root growth and water uptake accounting for photosynthesis, respiration, transpiration, and soil hydraulics. In: Hillel D ed. *Advances in Irrigation*, Vol 2. New York: Academic Press, 1983.
- [26] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The interdependent effects of soil temperature and water content in soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1975, 7: 373 — 378
- [27] 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. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(5): 473 — 480.
- [28] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, 52: 912 — 915.
- [29] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972 — 978.
- [30] Raich J W, Potter C S. Global pattern of carbon dioxide emission from soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23 — 36.
- [31] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, *et al.* Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese Fir plantation. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4):

584—590.

- [32] 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. *Journal of Plant Ecology*, 2003, 27(4): 441—447.
- [33] Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 97—103.
- [34] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217—227.
- [35] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8: 1205—1216.
- [36] Kirsebaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biochemistry*, 2000, 48: 21—51.
- [37] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 155—165.
- [38] Chang Z Q, Feng Q, Wu Y X, *et al.* Influence of environmental factors on soil CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in sub-alpine scrub forest of Qilian mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5): 666—672.
- [39] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71—90.

参考文献:

- [14] 钱亦兵,周华荣,徐曼,等. 克拉玛依农业开发区水土性状与荒漠植物多样性的关系. *水土保持学报*,2004,18(2):186~189.
- [15] 赵广东,王兵,杨晶,等. LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统及其应用. *气象科技*,2005,33(4):363~366.
- [16] 常学向,赵爱芬,赵文智,等. 黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况. *水土保持学报*,2003,17(2):126~129.
- [17] 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*,2005,35(6):493~501.
- [18] 张金霞,曹广民,周党卫,等. 草毡寒冻雏形土 CO₂ 释放特征. *生态学报*,2001,21(4):544~549.
- [27] 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. *科学通报*,2005,50(5):473~480.
- [29] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*,2003,23(5):972~978.
- [31] 杨玉盛,陈光水,王小国,等. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响. *土壤学报*,2005,42(4):584~590.
- [32] 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.
- [33] 房秋兰,沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. *植物生态学报*,2006,30(1):97~103.
- [38] 常宗强,冯起,吴雨霞,等. 祁连山亚高山灌丛林土壤呼吸速率的时空变化及其影响分析. *冰川冻土*,2005,27(5):666~672.