

DOI: 10.5846/stxb201404220795

刘跃辉, 买买提艾力·买买提依明, 杨帆, 杨兴华, 何清. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季土壤呼吸及其驱动因子分析. 生态学报, 2015, 35(20): - .
Liu Y H, Ali Mamtimin, Yang F, Yang X H, He Q. Environmental factors driving winter soil respiration in the hinterland of the Taklimakan Desert, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

塔克拉玛干沙漠腹地冬季土壤呼吸及其驱动因子分析

刘跃辉^{1,2,3}, 买买提艾力·买买提依明^{2,3,4,*}, 杨帆^{2,3}, 杨兴华^{2,3}, 何清^{2,3}

1 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

3 塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站, 塔中 841000

4 南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044

摘要: 利用 Li-8150 开路式土壤碳通量测定系统测定塔克拉玛干沙漠腹地塔中冬季(1月)土壤呼吸日变化, 分析环境驱动因子对极端干旱区荒漠生态系统土壤呼吸的影响。结果表明: (1) 冬季土壤呼吸日变化呈现出显著的单峰曲线, 土壤呼吸速率最大值出现在 12:00, 为 $0.0684 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 凌晨 04:00 附近出现最小值, 为 $-0.0473 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; (2) 土壤呼吸速率与各层气温, 0cm 地表温度均存在着极其显著或显著的线性关系, 且都具有正相关性; (3) 土壤呼吸速率与 5cm 土壤湿度存在着较为明显的线性关系, 该层湿度能够解释土壤呼吸的 69.5%; (4) 0cm 地表温度对土壤呼吸贡献最大, 其次是 5cm 土壤湿度; (5) 以 0cm 地表温度、5cm 土壤湿度为变量, 通过多元回归分析表明: 土壤温度-湿度构成的多变量模型能够解释大于 86.9% 的土壤呼吸变化情况; (6) 研究时段内土壤呼吸速率的平均值是 $-1.45 \text{mg CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

关键词: 塔克拉玛干沙漠; 土壤呼吸; 温度; 土壤湿度

Environmental factors driving winter soil respiration in the hinterland of the Taklimakan Desert, China

LIU Yuehui^{1,2,3}, Ali Mamtimin^{2,3,4,*}, YANG Fan^{2,3}, YANG Xinghua^{2,3}, HE Qing^{2,3}

1 College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

3 Taklimakan Desert Atmosphere and Environment Station, Tazhong 841000, China

4 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: In order to analyze the environmental drivers of soil respiration in an extreme arid desert ecosystem, we measured diurnal variation in winter soil respiration at Tazhong, a hinterland of Taklimakan Desert in northwest China. Regression analysis was performed with SPSS 21.0. We observed that: (1) Diurnal variation in winter soil respiration showed a single peak at 12:00 noon (local time), after which soil respiration began to decrease, reaching a minimum value at around 4:00 a.m. (2) Soil respiration and the air temperature at each height tested (0.5 m, 2 m) were significantly and positively correlated. Air temperature at 2 m was able to explain 67.8% of the diurnal variation in soil respiration. (3) Soil temperature at 0 cm, modeled by linear equations, was able to explain 86.3% of the diurnal variation in soil respiration, demonstrating that this process is more sensitive to temperature at 0 cm than at any other soil layer (10 cm, 20 cm, 40 cm). (4) Soil respiration exhibited a positive linear correlation with soil moisture at a depth of 5 cm. When linear regression analysis was used to model the relationship between these variables, the fitted linear model explained 69.5% of

基金项目: 国家自然科学基金(41175140); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306066)

收稿日期: 2014-04-22; 网络出版日期: 2014-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ali@idm.cn

the diurnal variation in soil respiration, demonstrating that, in the extreme arid desert ecosystem, this shallow layer of moisture exerts a large effect on soil respiration. (5) The greatest contributors to soil respiration were soil temperature at a depth of 0 cm, followed by soil moisture at 5 cm. (6) Multiple regression analyses showed that a multi-variable model of temperature and soil moisture explains 86.9% of the diurnal variation in soil respiration, which is not significantly better than a single-variable model. (7) For winter soil respiration, the daily average rate of CO₂ absorption was -1.45mg CO₂/(m² · h).

Key Words: Taklimakan desert; soil respiration; temperature; soil moisture

土壤呼吸是指土壤与大气交换二氧化碳的过程,严格意义上讲是指未扰动土壤中产生的 CO₂ 的所有代谢作用,包括三个生物学过程(土壤微生物呼吸、根系呼吸和土壤动物呼吸)和一个非生物学过程,即含碳矿物质的化学氧化作用等生物学和非生物学过程^[1]。据统计,全球土壤碳库量为 1300—2000Pg C,占到全球碳储存总量的 67%^[2]。土壤呼吸是从土壤碳库中释放碳,是大气碳库的 4 倍^[3],因此,土壤呼吸的微小变化就能强烈地影响并且改变大气 CO₂ 浓度的平衡,进而影响区域及全球碳循环的过程^[4-5]。为了预测土壤呼吸对区域及全球气候变化响应而导致的相应碳循环的变化,我们很有必要进一步对土壤呼吸进行更加深入的研究。

塔克拉玛干沙漠是我国乃至全球自然生态系统人类活动最少的地区之一,它具有北半球中纬度典型的温带荒漠生态系统,这一特殊区域的生态系统碳交换过程对于区域生态系统碳平衡无疑起着极其重要的作用。同时,沙漠区域具有极端的环境条件,土壤含水量少、有机质含量低且易受气候变化影响而发生明显变异^[6-7]。由于土壤呼吸对环境变化高度敏感性,使土壤呼吸成为量化荒漠生态进程的指标之一^[8]。近年来,国内外针对沙漠区域土壤呼吸的研究已经取得了一些进展,Luske 等^[9]认为沙漠土壤碳库初始值通常极小,仅略高于检测限,与其他类型土壤相比之下更有可能作为碳的汇。Thomas 等^[10]在非洲南部的卡拉哈里沙漠进行土壤呼吸观测试验时,指出沙漠土壤在微生物作用下吸收 CO₂,并进一步研究了温度、降水脉冲及生物结皮盖度对土壤呼吸速率的影响^[11]。谢静霞等^[12]对古尔班通古特沙漠土壤呼吸速率进行分析,发现荒漠盐碱土吸收大量 CO₂,有研究发现土壤无机过程可以很好地解释这一现象^[13]。李玉强等通过分析科尔沁沙地的土壤呼吸速率,得出从流动沙丘、半固定沙丘到固定沙丘的平均土壤呼吸速率依次增大,同时指出了土壤呼吸速率与气温变化的关系^[14]。张丽华等^[15]深入研究了典型温带荒漠中温度和土壤湿度对土壤呼吸速率的影响。然而,关于流动沙漠腹地土壤呼吸的变化规律及非生物因素对其产生的影响仍尚未见报道。

本文以塔克拉玛干沙漠腹地塔中的土壤为研究对象,探讨塔中冬季土壤呼吸速率的日变化特征,分析土壤呼吸速率与环境驱动因子之间的相互关系,比较土壤呼吸速率对气温、土壤温度以及土壤湿度的响应程度,通过认识和了解极端干旱沙漠区土壤呼吸速率的基本特征,为区域及全球碳循环研究提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所在塔克拉玛干沙漠腹地塔中建立的塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站——西侧 2.2km 沙垄下方平缓自然沙丘上的塔中 A 站(38°58' N, 83°38' E, 海拔 1093m),该站地处塔克拉玛干沙漠腹地塔里木油田塔中 4 油田作业区北侧,是目前世界上唯一深入流动沙漠腹地 200km 以上的大气环境观测试验站。该地区属于极为典型的大陆干旱区荒漠气候,夏季高温炎热,冬季严寒干冷。根据塔中气象站 1997 年—2012 年历年各月气温和降水量平均值的统计资料,该地区年平均气温 12.0℃,夏季 7 月最热,平均气温为 28.4℃,冬季 1 月最冷,平均温度为 -10.0℃。冬季时段多年平均气温为 -6.8℃,且无稳定积雪。年平均降水量为 24.3mm,主要集中在 5—8 月,占全年降水量的 89%左右,年平均蒸发量约为 3800mm。观测场地平坦开阔,下垫面为平缓自然流沙面,植被盖度为零,且冬季土壤没有水分冻结^[16],主要观测项目有风、温、湿梯度,多层土壤温湿度,土壤热通量,以及辐射分量等常规气象要素。

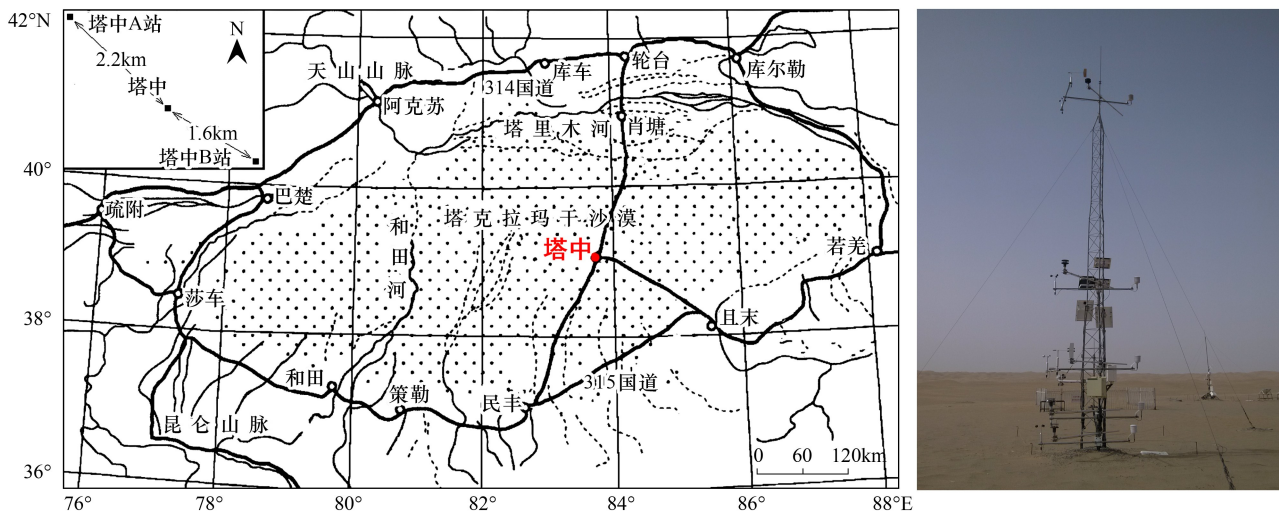


图1 研究区(塔中A站)位置及10m 梯度常规气象观测系统示意图

Fig.1 The observation station at Tazhong near the highway from the desert marginal zone is 229 km

The locations of Tazhong A and Tazhong B are around the Tazhong station shown in the top left

2 研究方法和数据处理

2.1 研究方法

利用 Li-8150 (型号: LI-COR, Lincoln, NE, USA) 土壤碳通量测定系统测定塔克拉玛干沙漠腹地塔中的土壤呼吸日变化动态。选择塔中 A 站平缓自然流沙面(无任何植被覆盖)进行野外测定(图 2),测定前一天将横截面积为 371.8cm^2 , 高度 10cm 的圆柱形 PVC 土壤环嵌入土壤中,嵌入深度约 7cm。经过 24h 平衡后,土壤呼吸速率恢复至土壤环放置前水平,从而避免了由于安置气室对土壤局部扰动造成短期内土壤呼吸速率波动。

观测日期从 2013 年 1 月 17 日 16:06 至 2013 年 2 月 1 日 07:44 (地方时,下同),在同一时段重复测定 4 次,共获得有效数据 1408 组,将同一时段通量数据进行小时平均,获取小时平均数据 352 组。在测定土壤呼吸速率的同时,利用塔中 A 站 10m 梯度常规气象观测系统测定了气温、土壤温度和土壤湿度,其仪器型号见表 1。

2.2 数据处理

所有数据的统计分析在 Excel 2013 和 SPSS 21.0 软件中完成,采用 SigmaPlot 12.5 作图。土壤呼吸 [R_s , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] 和气温、土壤温度 (T , $^{\circ}\text{C}$), 土壤湿度 (M , %) 之间的关系采用线性回归程序分析:

$$R_s = b_0 + b_1 T \quad (1)$$

式中: b_0 、 b_1 分别是回归分析中估算的拟合参数; T 表示气温、土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$); M 为土壤湿度 (%)。

其次,采用以下线性和非线性方程分别拟合 R_s 与 T 、 M 间的关系:

$$R_s = a + bT + cM \quad (2)$$

$$R_s = a + bT + cM + d(TM) \quad (3)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 分别是回归分析中估算的拟合参数; 方程(3)中引入了新的变量 TM 。

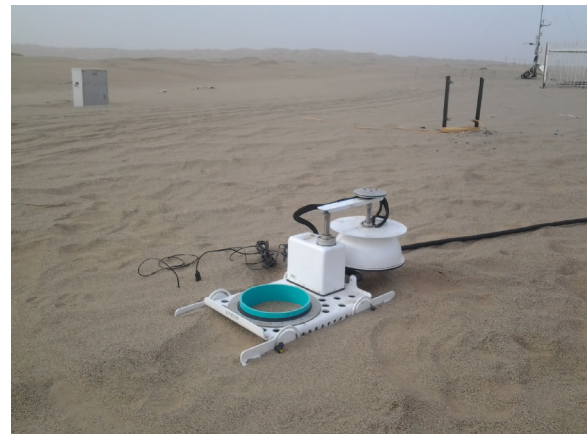


图2 Li-8150 土壤碳通量测定系统

Fig.2 Li-8150 Soil CO₂ efflux system

表 1 塔中 A 站 10m 梯度观测系统所用部分仪器

Table 1 Measuring items, levels and sensors at Tazhong A

项目 Items	高度/深度 Height/depth	传感器 Sensors	技术性能参数 Summary of measurement performance
空气温度 Air temperature profile	0.5, 1, 2, 4, 10m	Vaisala, HMP45C	Measurement range: -39.2° to $+60^{\circ}\text{C}$; Output Signal Range: 0.008 to 1.0 V Accuracy: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (-40°C), $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (20°C), $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (0°C), $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (20°C), $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (40°C), $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (60°C)
土壤温度 Soil temperature profile	0, - 10, - 20, -40cm	Campbell, 109-L	Temperature measurement range: $- 50^{\circ}$ to $+ 70^{\circ}\text{C}$; Linear error: the maximum error is 0.03°C (50°C); Interchangeability error: Typically $< \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ over 0° to 70°C range; increasing to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ at -50°C
土壤湿度 Soil moisture profile	- 5, - 10, - 20, -40cm	Campbell, CS616-L	probe-to-probe variability: $\pm 0.5\%$ VWC in dry soil, $\pm 1.5\%$ VWC in typical saturated soil; Precision: 0.05% VWC; Resolution: 0.1% VWC

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸的日变化过程

塔克拉玛干沙漠腹地塔中冬季(1月)土壤呼吸速率日变化动态如图3所示,可以看出,沙漠腹地冬季土壤呼吸速率日变化呈现出显著的单峰曲线(误差线显示5%的正负潜在误差量)。土壤呼吸速率最大值为 $0.0684\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$,出现在 12:00,之后土壤呼吸速率受到抑制,呈下降趋势,紧接着在凌晨 04:00 附近出现最小值,为 $-0.0473\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。观测期间土壤呼吸速率变化范围为 $-0.0875\text{—}0.1175\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (以小时平均计算),平均速率为 $-0.00915\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$,相当于 $-1.45\text{mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。其中,白天时段(10:00—17:00)土壤呼吸速率为正值,其余时段(18:00—09:00)均为负值,在夜间时段(22:00—06:00),土壤呼吸速率变化平稳,基本维持在 $(-0.0425\pm 0.00095)\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。此外,在将每小时的土壤呼吸量换算为每天的土壤呼吸量时,可以简单地处理为:(小时平均的土壤呼吸量) $\times 24$,从而得到每天的土壤呼吸量约为 $34.80\text{mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

3.2 土壤呼吸和温度的关系

在干旱区,温度是调节和控制许多生态学进程的关键性因素,同时也是影响土壤呼吸速率的决定性因子之一^[17]。采用土壤呼吸速率与 0cm 地表温度、2m 处气温连续 15 天观测的小时平均数据,分析地表温度和气温与土壤呼吸速率的日变化动态过程,结果见图 4(a, b, c, d)。从图 4a 可知:0cm 地表温度与土壤呼吸速率的昼夜变化趋势较为一致,0cm 地表温度最高(低)值分别比土壤呼吸速率最大(小)值延迟 1h 和 3h 出现。其中,夜间时段(22:00—07:00),0cm 地表温度波动范围在 $-16.2\text{—}11.8^{\circ}\text{C}$,对应的土壤呼吸速率变化较为稳定。2m 高处气温与地表温度变化过程相似,但其最高(低)值均比对应的土壤呼吸速率最大(小)值延迟 3h 出现(图 4b)。

通过线性方程分别拟合土壤呼吸速率与距地表 0.5m、2m 处气温以及 0cm、10cm、20cm、40cm 土壤温度,

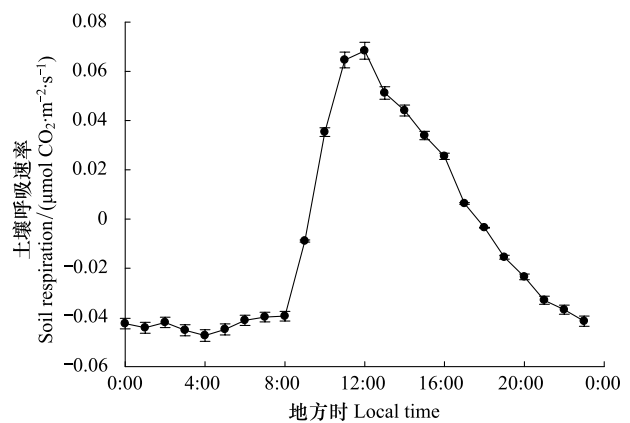


图 3 观测期间塔克拉玛干沙漠腹地塔中冬季(1月)土壤呼吸速率的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of soil respiration rate over the hinterland of Taklimakan desert during the study period

在 95% 的置信区间内,采用决定系数 R^2 解释土壤呼吸的变异量,结果见表 2。土壤呼吸速率和气温、0cm 地表温度间的拟合关系均较好,也就是说线性方程能很好地描述土壤呼吸对气温、0cm 地表温度的响应。0cm 地表温度与土壤呼吸速率间具有显著的线性正相关关系(图 4c),决定系数 R^2 为 0.863,然而,在 10cm、20cm、40cm 土壤温度中却没有得到明显的拟合关系,结合表 2 可知,温度对土壤呼吸的贡献程度随着土壤深度的递增而明显减弱,在 10cm、20cm、40cm 土壤深度处对土壤呼吸的贡献几乎可以忽略,这表明温度对土壤呼吸速率的影响主要局限在土壤表面,土壤呼吸对 0cm 土壤温度的响应敏感程度明显高于其他各层土壤温度。

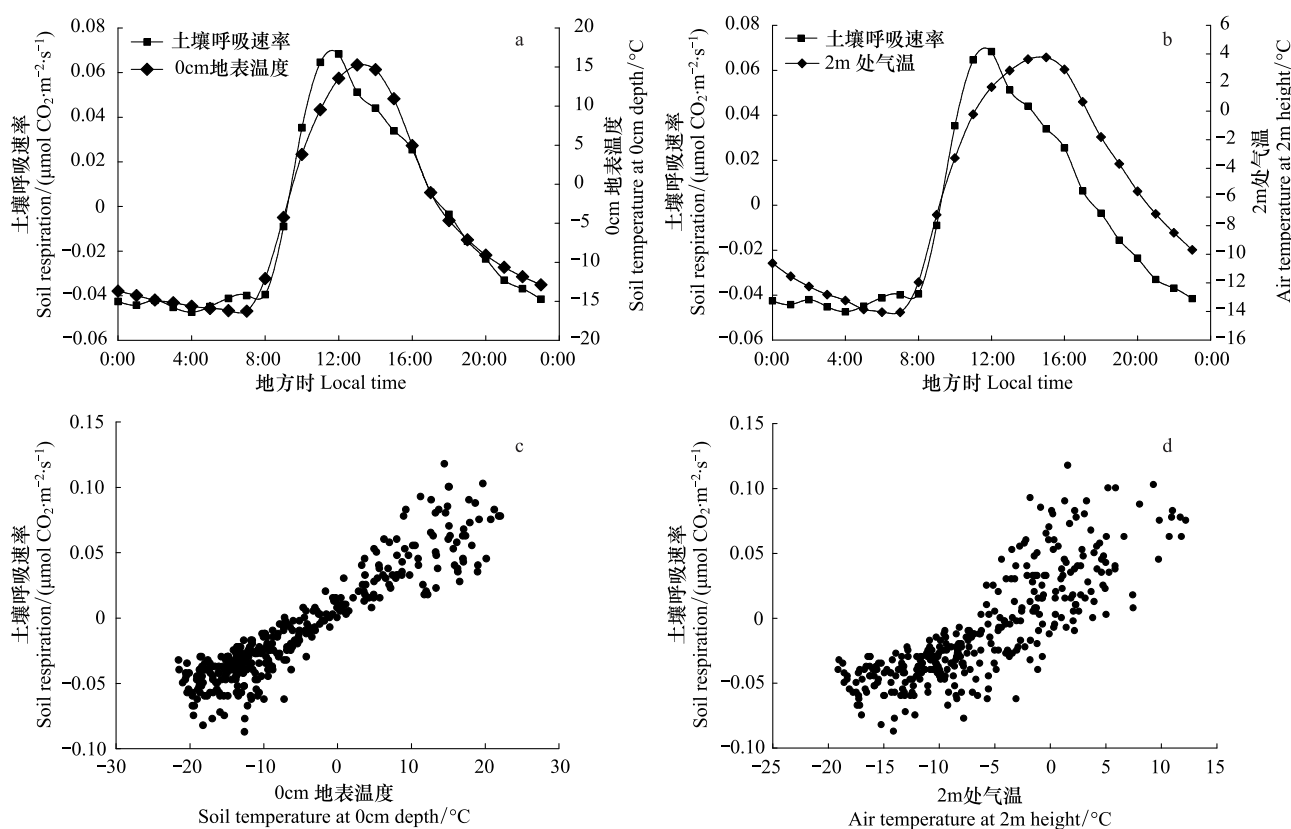


图 4 观测期间沙漠腹地土壤呼吸速率与 0cm 地表温度、2m 处气温的关系

Fig.4 The relationship between soil respiration rate and soil temperature at 0cm, air temperature at 2m height over the hinterland of Taklimakan desert during the study period

表 2 观测期间沙漠腹地土壤呼吸速率与气温、土壤温度间的回归分析*

Table 2 Regression analysis between soil respiration rate and air temperature, soil temperature over the hinterland of Taklimakan desert during the study period

温度 Temperature	变量 Variables	决定系数 R^2	显著性 Sig.	回归方程 Regression equation
气温 Air temperature	Ta_0.5m	0.725	< 0.001	$y = 0.005x + 0.022$
	Ta_2m	0.678	< 0.001	$y = 0.005x + 0.020$
土壤温度 Soil temperature	Ts_0cm	0.863	< 0.001	$y = 0.003x + 0.008$
	Ts_10cm	0.002	0.378	$y = 0.001x - 0.008$
	Ts_20cm	0.071	< 0.001	$y = -0.006x - 0.029$
	Ts_40cm	0.009	0.079	$y = 0.006x - 0.006$

* * 表中为观测期间的小时平均数据, N = 352

3.3 土壤呼吸和土壤湿度的关系

通过分析沙漠腹地冬季土壤呼吸速率与 5cm 土壤湿度的关系后发现,5cm 土壤湿度波动范围相对很小且

波动范围窄,仅为 0.023%—0.028%,与对应的土壤呼吸速率日变化趋势相似,即同样表现为明显的昼夜变化波动,且土壤呼吸速率最大值先于土壤湿度 2h 出现(图 5a)。此外,回归分析结果发现,在 95%的置信区间内,沙漠腹地土壤呼吸速率与 5cm 土壤湿度存在着显著的线性正相关关系(图 5b),对应的回归方程为: $y = 25.538x - 0.681$,决定系数 R^2 为 0.695 (Sig.<0.001)。

土壤呼吸速率对土壤湿度的微量变化响应敏感。图 5a 可知,当 5cm 土壤湿度在 0.0245% 时,土壤呼吸速率仅为 $-0.0425 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,土壤湿度增加到 0.0269%,此时土壤呼吸速率达到最大,为 $0.0684 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。不难看出,随着土壤湿度的轻微改变,土壤呼吸速率由负转正,显然土壤呼吸在吸收和释放 CO_2 间发生了转化,这表明 5cm 土壤湿度微量变化对极端干旱沙漠区土壤呼吸有较大影响。

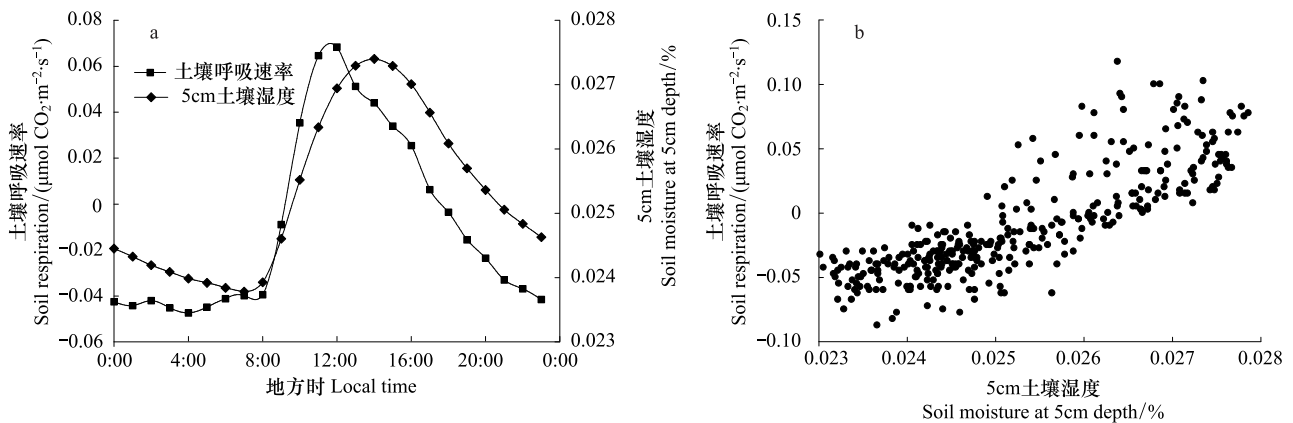


图 5 观测期间土壤呼吸速率与土壤湿度变化关系

Fig.5 Relationship between soil respiration rate and soil moisture at 5cm depth changes during the study period

3.4 土壤呼吸与温度、土壤湿度的协同关系

沙漠地区降水量极少,土壤湿度大小与土壤温度变化有一定关系。研究表明,较为干旱荒漠区的土壤呼吸主要受温度和土壤湿度的共同调控^[18],二者之间可能存在较为复杂的变化机制。以 2m 处气温,0cm 地表温度,5cm 土壤湿度为变量,采用线性回归中的逐步回归分析方法,在 95%的置信区间内,分析上述土壤呼吸速率与上述变量之间的关系,结果见表 3。然后通过方程(3)分析土壤呼吸速率与 0cm 地表温度和 5cm 土壤湿度之间的关系,分析结果表明该方程可用于描述土壤呼吸速率受地表温度和土壤湿度的协同影响且相应的回归方程达到显著水平 (Sig.<0.001)。两个方程拟合结果基本接近,得出的多变量模型可以解释土壤呼吸 86.9% 以上的变化情况。

表 3 观测期间沙漠腹地土壤呼吸速率与温度、土壤湿度的多元分析结果*

Table 3 Results of multiple regression analysis between soil respiration rate and soil temperature at 0cm, soil moisture at 5cm depth analysis over the hinterland of Taklimakan desert during the study period

方程 Equation	决定系数 R^2	显著性 Sig.	回归方程 Regression equation
(2)	0.869	< 0.001	$R_s = 0.182 + 0.004T - 6.718M$
(3)	0.870	< 0.001	$R_s = 0.230 + 0.007T - 8.946M - 0.125(TM)$

* * 表中为观测期间的小时平均数据, N=352; T 为 0cm 地表温度。

4 讨论

本次观测试验时间相对较短。因此,对试验资料能否代表整个冬季的情况从气候差异角度进行了分析。试验期间,空气温度平均值在 -7.5°C 左右,这与塔中气象站 1997 年—2012 年冬季多年平均温度 -6.8°C 较为接近,因此认为试验期间的所测得的数据能够代表整个冬季土壤呼吸的变化特征。

对塔克拉玛干沙漠腹地冬季土壤呼吸日变化的研究表明,土壤呼吸速率观测值均非常小且变化范围较窄,这是由沙漠腹地极端的环境条件所决定,主要表现为土壤中微生物类群、数量及其分布相对较少^[19]且有机质非常贫乏^[20],缺少根系呼吸造成的^[3]。这一现象还可能与微生物活动的温度临界值有关,这是因为微生物在沙漠土壤表层分布密度较高^[21],而90%的微生物活动发生在土壤0—15cm深度^[22],低于这个温度临界值,会使土壤酶活性和一系列生化反应速率受到抑制^[23],无机过程相对减弱,从而造成土壤呼吸作用相应地弱化。王忠媛等^[24]研究表明在土壤类型一定时,土壤无机CO₂通量主要受温度控制,夜晚低温有利于土壤无机过程吸收CO₂,而白天温度较高则有利于CO₂释放,这能较好地解释沙漠腹地夜间为明显CO₂汇,白天为CO₂源的现象。有研究认为,在非冻结的土壤水分情况下(-10℃),有土壤呼吸过程存在^[25],甚至在-20℃以下,仍能检测到土壤呼吸发生^[26],这一结果在本文对沙漠腹地冬季土壤呼吸的研究中得到进一步证实。由于冬季观测到的土壤呼吸速率很小^[27-28],很长一段时间都认为冬季土壤呼吸可以忽略^[25,29],但有研究发现,冬季土壤呼吸可以占到全年土壤呼吸的很大比例^[30-31],是全年碳收支的重要组成部分^[32],并能显著影响生态系统的碳平衡^[33]。本文得出塔克拉玛干沙漠腹地每天的呼吸量为34.80mg CO₂/(m²·d),也证明了上述观点,但是与Suzuki^[34]、Nobrega^[35]、Wang^[36]等对极地苔原和森林冬季土壤呼吸释放CO₂的研究结果相反,这很可能与沙漠土壤为流沙面,缺少植被覆盖有关。

试验期间,土壤呼吸时间变化对0cm地表温度的响应程度明显高于土壤其他各层温度,这与张丽华^[15]、黄湘^[37]、Osozawa^[38]等人对半干旱区和干旱区土壤呼吸的研究结果相似。另外,在古尔班通古特沙漠进行的研究表明,0cm地表温度能很好地解释土壤呼吸的日变异^[39],周洪华等^[40]对干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变异的研究表明,其土壤呼吸与气温,0cm地表温度均存在着显著的相关性,这与本文的研究报道相一致。

许多研究证明,土壤呼吸与温度之间存在指数相关^[41-45]。然而,在本研究中,通过监测和分析塔中冬季土壤呼吸的日变化动态,发现各层气温与0cm地表温度对土壤呼吸速率日变化的影响几乎都可以用线性方程来表示,即线性方程就可以很好地描述土壤呼吸对上述变量的响应,这表明在沙漠腹地温度对土壤呼吸速率日变化的影响是极其明显的,其中0cm地表温度是影响土壤呼吸速率的主要环境因子($R^2 = 0.863$)。研究显示,不同的生态系统中土壤呼吸速率与土壤湿度间存在着正相关、负相关或不相关关系^[46],本文的研究报道得出极端干旱沙漠区冬季土壤呼吸与5cm土壤湿度呈显著正相关,这一结果与黄湘等^[37]的研究结果相近,但与张丽华等^[15]在干旱荒漠区土壤呼吸中的研究结论相反。构建的土壤湿度线性模型能解释土壤呼吸日变化的69.5%,这说明在极端干旱沙漠区,土壤湿度同样是限制土壤呼吸的重要环境因子之一。本文得出土壤温度-土壤湿度组成的多变量模型可以解释大于86.9%的土壤呼吸变化情况。研究结果表明,土壤温度和湿度都是影响沙漠区土壤呼吸速率的重要因素,且土壤温度对土壤呼吸的贡献要大于土壤湿度,但这一结果与Luo等认为在沙漠中土壤呼吸受土壤湿度的影响最大^[3]的报道相反,因此有必要在后续的研究中针对这一现象展开长期观测。

5 结论

(1)塔克拉玛干沙漠腹地冬季土壤呼吸日变化呈现出显著的单峰曲线。土壤呼吸速率最大值出现在12:00,最小值出现在凌晨04:00附近。

(2)土壤呼吸速率与0cm地表温度呈显著的线性正相关($R^2 = 0.863$),研究表明,0cm地表温度是影响土壤呼吸速率的决定性环境驱动因子。

(3)土壤呼吸速率与5cm土壤湿度间存在着明显的线性关系($R^2 = 0.695$),这表明在极端干旱荒漠区,浅层土壤湿度是制约土壤呼吸速率的重要环境因子之一。

(4)沙漠腹地土壤从大气中净吸收CO₂的量约为34.80mg CO₂/(m²·d),研究表明,沙漠腹地为明显的碳汇。

致谢:本次野外观测实验得到中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所吉春容副研究员和邹陈助理研究员的现场指导,在此深表感谢。

参考文献 (References):

- [1] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, 1977, 43(4):449-528.
- [2] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351(6324):304-306.
- [3] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 温逸馨, 译. 北京:高等教育出版社, 2007:18-21.
- [4] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6):753-760.
- [5] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404(6780):858-861.
- [6] Noy-Meir I. Structure and function of desert ecosystems. *Israel Journal of Botany*, 1979, 28(1):1-19.
- [7] West N E, Stark J M, Johnson D W, Abrams M M, Wight J R, Heggem D, Peck S. Effects of climatic change on the edaphic features of arid and semiarid lands of western North America. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1994, 8(4):307-351.
- [8] Xu L K, Baldocchi D D, Tang J W. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(4), doi:10.1029/2004GB002281.
- [9] Luske B, van der Kamp J. Carbon sequestration potential of reclaimed desert soils in Egypt. *Louis Bolk Institute & Soil and More International*, 2009.
- [10] Thomas A D, Hoon S R. Carbon dioxide fluxes from biologically-crusts Kalahari Sands after simulated wetting. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1):131-139.
- [11] Thomas A D, Hoon S R, Dougill A J. Soil respiration at five sites along the Kalahari Transect: effects of temperature, precipitation pulses and biological soil crust cover. *Geoderma*, 2011, 167-168:284-294.
- [12] Xie J X, Li Y, Zhai C X, Li C H, Lan Z D. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. *Environmental Geology*, 2009, 56(5):953-961.
- [13] Ma J, Wang Z Y, Stevenson B A, Zheng X J, Li Y. An inorganic CO₂ diffusion and dissolution process explains negative CO₂ fluxes in saline/alkaline soils. *Scientific Reports*, 2013, 3, doi:10.1038/srep02025.
- [14] 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 刘新平. 科尔沁沙地夏秋(6-9月)季不同类型沙丘土壤呼吸对气温变化的响应. *中国沙漠*, 2008, 28(2):249-254.
- [15] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋, 葛洪涛. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸. *生态学报*, 2008, 28(5):1911-1922.
- [16] 李江凤. 塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候. 北京:科学出版社, 2003:219-219.
- [17] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 毛伟, 崔夺, 曲浩, 连杰, 罗永清. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展. *生态学报*, 2012, 32(15):4890-4901.
- [18] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, 7(6):373-378.
- [19] 顾峰雪, 文启凯, 潘伯荣, 杨玉锁. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被下土壤微生物的初步研究. *生物多样性*, 2000, 8(3):297-303.
- [20] Rosenberg N J. 小气候:生物环境. 何章起, 施鲁怀, 译. 北京:科学出版社, 1982.
- [21] Cable J M, Ogle K, Tyler A P, Pavao-Zuckerman M A, Huxman T E. Woody plant encroachment impacts on soil carbon and microbial processes: results from a hierarchical Bayesian analysis of soil incubation data. *Plant and Soil*, 2009, 320(1/2):153-167.
- [22] Fierer N, Schimel J P. 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*, 2003, 67(3):798-805.
- [23] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(8):1061-1066.
- [24] 王忠媛, 谢江波, 王玉刚, 李彦. 盐碱土土壤无机 CO₂ 通量与土壤盐碱性的关系. *生态学杂志*, 2013, 32(10):2552-2558.
- [25] Fahnestock J T, Jones M H, Brooks P D, Walker D A, Welker J M. Winter and early spring CO₂ efflux from tundra communities of northern Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D22):29023-29027.
- [26] Panikov N S, Flanagan P W, Oechel W C, Mastepanov M A, Christensen T R. Microbial activity in soils frozen to below -39°C. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(4):785-794.

- [27] King J S, Hanson P J, Bernhardt E, DeAngelis P, Norby R J, Pregitzer K S. A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO₂ from four forest FACE experiments. *Global Change Biology*, 2004, 10(6):1027-1042.
- [28] Parsons A N, Barrett J E, Wall D H, Virginia R A. Soil carbon dioxide flux in Antarctic dry valley ecosystems. *Ecosystems*, 2004, 7(3):286-295.
- [29] 方精云, 王妮. 作为地下过程的土壤呼吸:我们理解了多少?. *植物生态学报*, 2007, 31(3):345-347.
- [30] Jones H G. The ecology of snow-covered systems;a brief overview of nutrient cycling and life in the cold. *Hydrological Processes*, 1999, 13(14-15):2135-2147.
- [31] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, Turnipseed A A, Delany A C, Williams M W, Schmidt S K. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 2006, 439(7077):711-714.
- [32] Mast M A, Wickland K P, Striegl R T, Clow D W. Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(4):607-620.
- [33] Hubbard R M, Ryan M G, Elder K, Rhoades C C. Seasonal patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forests. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1):93-107.
- [34] Suzuki S, Ishizuka S, Kitamura K, Yamanoi K, Nakai Y. Continuous estimation of winter carbon dioxide efflux from the snow surface in a deciduous broadleaf forest. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2006, 111(D17), doi:10.1029/2005JD006595.
- [35] Nobrega S, Grogan P. Deeper snow enhances winter respiration from both plant-associated and bulk soil carbon pools in birch hummock tundra. *Ecosystems*, 2007, 10(3):419-431.
- [36] Wang W, Peng S S, Wang T, Fang J Y. Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3):451-458.
- [37] 黄湘, 李卫红, 陈亚宁, 马建新. 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.
- [38] Osozawa S, Hasegawa S. Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an Andisol. *Soil Science*, 1995, 160(2):117-124.
- [39] Su Y G, Wu L, Zhou Z B, Liu Y B, Zhang Y M. Carbon flux in deserts depends on soil cover type:A case study in the Gurbantunggute desert, North China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58:332-340.
- [40] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 曹志超, 李稚. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素. *地理科学*, 2011, 31(2):190-196.
- [41] van't Hoff J H. *Études de dynamique chimique*. Amsterdam:Frederik Muller and Co., 1884.
- [42] Wiant H V. Influence of temperature on the rate of soil respiration. *Journal of Forestry*, 1967, 65(7):489-490.
- [43] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, 52(5):912-915.
- [44] Grace J, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, 404(6780):819-820.
- [45] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11-12):1625-1635.
- [46] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-A modified model. *Plant and Soil*, 2005, 268(1):21-23.