

朱新萍,贾宏涛,周建勤,等.降雨对干旱半干旱区湿地和农田土壤CO<sub>2</sub>短期释放的影响[J].农业资源与环境学报,2017,34(1):54-58.

ZHU Xin-ping, JIA Hong-tao, ZHOU Jian-qin, et al. Response of Soil CO<sub>2</sub> Short-term Emissions to Simulated Rainfalls in Arid and Semi-arid Area [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(1): 54-58.

# 降雨对干旱半干旱区湿地和农田土壤CO<sub>2</sub>短期释放的影响

朱新萍<sup>1,2</sup>,贾宏涛<sup>1,2</sup>,周建勤<sup>1,2</sup>,蒋平安<sup>1,2</sup>,克热木阿依<sup>1</sup>,张雨佳<sup>1</sup>,张岚<sup>1</sup>

(1.新疆农业大学草业与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆土壤与植物生态过程实验室,新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**本研究以巴音布鲁克湿地和农田灰漠土原状土为研究对象,进行原位模拟降雨试验,利用LI-8100土壤碳通量自动测量系统测定土壤的CO<sub>2</sub>排放,研究了不同降雨量对土壤CO<sub>2</sub>排放的影响。结果表明:降雨导致湿地土壤CO<sub>2</sub>释放速率显著增加( $P<0.01$ ),而农田土壤无显著差异。在其含水量无明显差异下,湿地不同降雨处理组的CO<sub>2</sub>排放量均大于农田组,湿地土壤CO<sub>2</sub>日累积排放量降水10 mm组>降水20 mm组>对照组,土壤有机碳高的湿地土壤随降雨量增加,土壤短期碳损失高,而对低有机碳土壤(西北干旱区贫瘠土壤)短期碳损失影响不显著。降雨后农田土壤降水10 mm组CO<sub>2</sub>排放与地表温度和5 cm地温相关性极显著( $P<0.01$ ),其他各处理均未呈现显著相关。说明在干旱半干旱区降雨量对土壤CO<sub>2</sub>排放速率有着重要的影响。

**关键词:**降雨;CO<sub>2</sub>排放;湿地;农田

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2017)01-0054-05 doi: 10.13254/j.jare.2016.0109

## Response of Soil CO<sub>2</sub> Short-term Emissions to Simulated Rainfalls in Arid and Semi-arid Area

ZHU Xin-ping<sup>1,2</sup>, JIA Hong-tao<sup>1,2</sup>, ZHOU Jian-qin<sup>1,2</sup>, JIANG Ping-an<sup>1,2</sup>, KE Remu Ayi<sup>1</sup>, ZHANG Yu-jia<sup>1</sup>, Zhang Lan<sup>1</sup>

(1.College of Grassland and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2.Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Precipitation is one of the key factors that influence the soil respiration. A simulated precipitation experiment focused on response of wetland and farmland soil CO<sub>2</sub> emissions to simulated rainfalls using a LI-8100 automated soil CO<sub>2</sub> flux system(LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) was carried out. The dynamics of diurnal soil respiration rate and the correlations between soil respiration rate and soil temperature were also evaluated in this paper. Results showed that precipitation could stimulate wetland soil CO<sub>2</sub> emission rate( $P<0.01$ ), but this phenomenon could not be found in farmland soil. Under the same soil water content, different precipitation groups of CO<sub>2</sub> emissions in wetland soil were greater than that in farmland. The wetland soil cumulative CO<sub>2</sub> emissions was greatest at 10 mm precipitation group, followed by 20 mm precipitation group, and control group had the smallest values. With the increase of rainfall, the wetland soil that had high organic carbon released high CO<sub>2</sub> in short-term, and soil of low organic carbon (arid zone of northwest arid soil) had insignificant effect on soil carbon loss. Farmland soil CO<sub>2</sub> emission rate was significantly correlated with soil temperature(0 cm, 5 cm) under 10 mm precipitation group( $P<0.01$ ). The change of the farmland soil cumulative CO<sub>2</sub> was in accordance with the change of wetland soil. This finding indicated that precipitation was the important factor influencing the response of soil CO<sub>2</sub> emissions in arid and semi-arid area.

**Keywords:** precipitation; CO<sub>2</sub> emission; wetland; farmland

土壤呼吸是全球陆地碳循环中的重要环节之一,是土壤碳素向大气输出的重要途径<sup>[1]</sup>,土壤碳库的较

小变动即会显著改变大气中CO<sub>2</sub>浓度和土壤碳沉积速率<sup>[2]</sup>。因此,以土壤呼吸为主体的土壤碳排放过程成为引起气候变化的重要因素之一<sup>[3]</sup>。在全球气候变化背景下,区域降水格局在水气循环的驱动下发生了深刻的变化<sup>[4]</sup>,在世界范围内频繁发生短时间区域性极端气候事件<sup>[5-7]</sup>,气温升高伴随的降水格局改变在干旱

收稿日期:2016-04-25

基金项目:新疆自然科学基金(2013211B17)

作者简介:朱新萍(1978—),女,博士,硕士生导师,主要从事干旱区区域环境变化、生态环境质量安全与评价相关研究。  
E-mail:zhuxinp1978@163.com

半干旱地区尤为明显,因此,探讨降水对陆地生态系统土壤呼吸短期的影响,再进一步探讨其影响机制,对准确地评估全球碳收支具有重要的意义<sup>[9]</sup>。

降水对土壤呼吸的影响目前已受到广泛的关注,有研究认为在热带沙漠地区土壤遭受不连续的、阵发性的降水,会对土壤微生物产生激发作用<sup>[10]</sup>,夏季发生于半干旱地区的阵发式降水能够强烈地激发土壤中CO<sub>2</sub>的释放量<sup>[10]</sup>,降水能够迅速改变干旱区生态系统土壤碳平衡状况<sup>[11]</sup>,降水引起的干湿交替对农田土壤“Birch效应”的影响机制<sup>[12]</sup>以及模拟降雨研究也有所开展<sup>[13-15]</sup>,但目前在干旱半干旱区开展模拟降雨对土壤呼吸影响的研究较少,将不同土壤间进行对比研究的报道更少,因此本研究以从野外采集的湿地原状土和农田原状土为研究材料,进行模拟降雨试验,利用LI-8100A测定土壤呼吸,探索不同降雨量下土壤呼吸的响应特征,探讨土壤温度对土壤呼吸的影响,以加深对干旱半干旱生态系统土壤碳循环控制的机制理解。

## 1 材料与方法

### 1.1 原状土柱的采集

试验土壤来自新疆巴音布鲁克草原天鹅湖湿地及新疆阜康农田原状土,在野外采用直径为30 cm的PVC管进行原位原状土柱样品采集,将PVC管垂直砸入土壤中,保障土柱内样品不受干扰,样品采集深度为0~30 cm,湿地原状土植被为苔草(*Carex tristachya*)和早熟禾(*Poa pratensis*),土壤类型为草甸土,农田土壤类型为灰漠土,作物为棉花。

### 1.2 模拟降水试验设计

根据半干旱区降雨量全年约200~400 mm,模拟雨强(20 mm·min<sup>-1</sup>)相同条件下,降雨量对土壤呼吸的影响。每种类型土柱分3个处理组:无降水组(对照);降雨量为10 mm组;降雨量为20 mm组。每处理3个重复。模拟时间为2015年5月,气温10~16 ℃,风力3~4级东南风,晴。将原状土柱在室外自然状态放置30 d,测定初始含水量,两种土壤初始含水量在10%~15%范围之间。湿地土壤pH值为6.90,有机碳含量为90.85 g·kg<sup>-1</sup>,容重0.59 g·cm<sup>-3</sup>;农田土壤pH值为8.85,有机碳含量为8.28 g·kg<sup>-1</sup>,容重1.25 g·cm<sup>-3</sup>。采用便携式人工模拟降雨器模拟降雨,有效降雨高度为2 m,有效降雨面积为1 600 cm<sup>2</sup>,该装置可以调节降雨强度及雨滴大小,在正式试验前先进行预实验,调整好降雨器参数后进行正式试验。

### 1.3 监测方法与仪器

LI-8100土壤碳通量自动测量系统(LI-COR, Lincoln, USA)对CO<sub>2</sub>排放进行监测,监测时间从9:00开始至23:00,每2 h监测1次。地温用地温仪测定。土壤pH值用酸度计测定;土壤有机质采用重铬酸钾法测定;土壤容重用环刀法测定;土壤水分用烘干法测定。

### 1.4 数据分析

CO<sub>2</sub>累计排放量计算:

$$E = \sum \left( \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \cdot (t_{i+1} - t_i)$$

式中:E代表累积土壤CO<sub>2</sub>累积排放量(mol·m<sup>-2</sup>);F代表土壤CO<sub>2</sub>排放通量(μmol·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>);i代表采样次数;t代表采样时间(h)。实验数据利用Microsoft Excel 2013作图,用SPSS 17.0进行显著性分析(P<0.01)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同降雨量对湿地土壤CO<sub>2</sub>排放的影响

模拟降雨结束后,不同降雨量对湿地土壤CO<sub>2</sub>排放影响不同,由图1可知,在降雨后0.5 h测定(9:00左右)湿地土壤CO<sub>2</sub>排放速率,降雨量10 mm处理组的CO<sub>2</sub>排放量高于其他两组。湿地土壤无降水组(对照)、10 mm组和20 mm组CO<sub>2</sub>平均排放速率分别为1.69±0.23、3.63±0.39 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>和3.30±0.24 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,降雨激发了湿地土壤CO<sub>2</sub>排放速率(P<0.01)。对照组CO<sub>2</sub>排放速率曲线变幅不大。降雨10 mm组土壤CO<sub>2</sub>排放速率峰值出现在模拟降雨后9:00左右,为4.38 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,而降雨20 mm组土壤CO<sub>2</sub>排放速率峰值出现在19:00左右,值为3.77 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。10 mm和20 mm两降雨量处理下对土壤呼吸

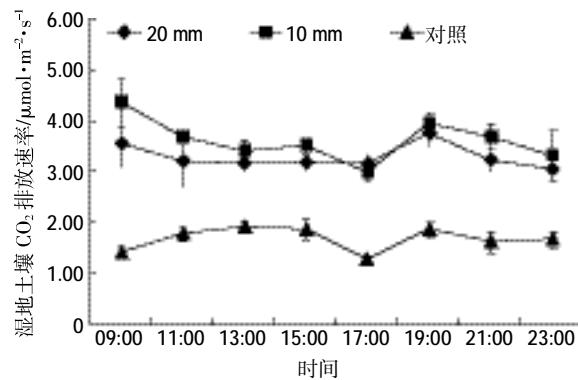


图1 降雨后湿地土壤CO<sub>2</sub>排放速率日变化特征

Figure 1 Variation of wetland soil CO<sub>2</sub> emissions after precipitation

速率影响无显著差异( $P<0.01$ )。

## 2.2 不同降雨量对农田土壤 $\text{CO}_2$ 排放的影响

农田土壤在模拟降雨中,由图2可知,降雨量增加可以增加土壤 $\text{CO}_2$ 排放速率,农田土壤无降水组(对照)、10 mm组和20 mm组 $\text{CO}_2$ 平均排放速率分别为 $1.02\pm0.14$ 、 $1.27\pm0.16$   $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.21\pm0.15$   $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,降雨使农田土壤 $\text{CO}_2$ 排放率增加,但影响不显著( $P<0.01$ )。农田土壤无降水组(对照)与20 mm组 $\text{CO}_2$ 排放曲线变化较为一致,为双峰曲线,两个峰值出现在大约13:00和19:00,分别为 $1.17$ 、 $1.32$   $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.23$ 、 $1.48$   $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。10 mm组 $\text{CO}_2$ 排放曲线也为双峰,一个是9:00,值为 $1.42$   $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,另一个在19:00,值为 $1.58$   $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

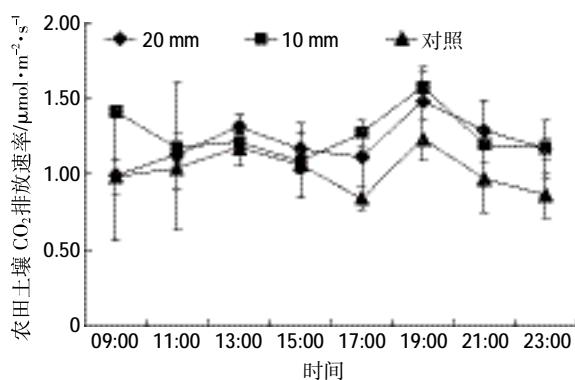
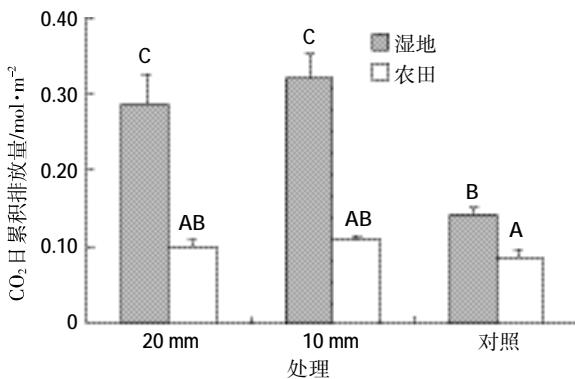


图2 降雨后农田土壤 $\text{CO}_2$ 排放速率日变化特征

Figure 2 Variation of farmland soil  $\text{CO}_2$  emissions after precipitation

## 2.3 不同降雨量与土壤日累积 $\text{CO}_2$ 排放量的关系

由图3可以得出湿地不同处理组的 $\text{CO}_2$ 日累积排放量均大于农田土壤,呈极显著差异( $P<0.01$ )。在不同降水量情况下,湿地土壤降雨10 mm组和20 mm组与对照 $\text{CO}_2$ 日累积排放量呈极显著差异( $P<0.01$ )。



不同大写字母代表不同降雨处理差异极显著( $P<0.01$ )

图3 不同降雨量下土壤日累积 $\text{CO}_2$ 排放量

Figure 3  $\text{CO}_2$  emissions in soils after precipitation

农田土壤与湿地土壤在不同降雨处理后 $\text{CO}_2$ 日累积排放量规律一样,但降雨量对 $\text{CO}_2$ 日累积排放量影响差异不显著( $P<0.01$ )。

## 2.4 温度与土壤 $\text{CO}_2$ 排放相关性分析

降雨结束后,由图4~图5可知,土壤地表温度变化幅度在15.0~21.2  $^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为18.65  $^{\circ}\text{C}$ ;土壤5 cm地温变幅在18.0~25.0  $^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为20.29  $^{\circ}\text{C}$ ;土壤5 cm地温比地表温度平均高1.64  $^{\circ}\text{C}$ 。湿地土壤 $\text{CO}_2$ 排放与土壤温度出现最高值时间并不一致,而农田土壤与土壤温度出现最高值时间较一致。经相关性分析(表1)可知,农田降雨10 mm组 $\text{CO}_2$ 排放速率与地表温度和5 cm地温相关性极显著( $P<0.01$ ),其他湿地和农田各处理与地温均为不显著相关。

## 3 讨论

干湿循环对土壤碳库的影响以及土壤碳库与全球气候变化因子(温度、湿度等)之间的反馈关系,决定了未来大气 $\text{CO}_2$ 浓度,是目前研究的热点。土壤

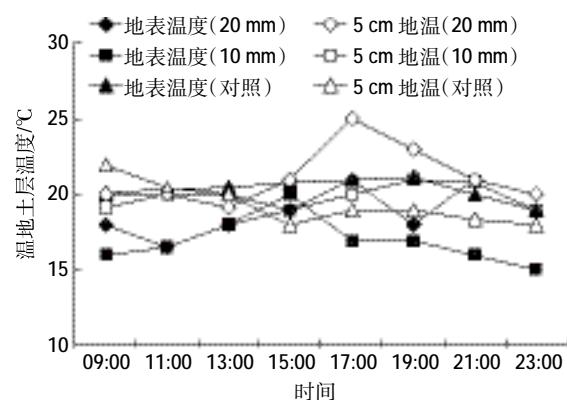


图4 湿地土壤地温日变化特征

Figure 4 Variation of temperature in wetland soil after precipitation

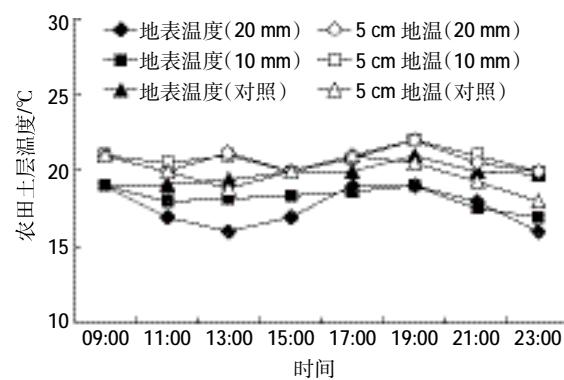


图5 农田土壤地温日变化特征

Figure 5 Variation of temperature in farmland soil after precipitation

表1 地温与CO<sub>2</sub>排放速率的相关性分析  
Table 1 The relationship between CO<sub>2</sub> emissions and soil temperature

土壤类型	处理	地表温度(0 cm)	地温(5 cm)
湿地	对照	y=0.038 8x+0.900 3 $R^2=0.013\ 8$	y=-1.440 7x+21.8 $R^2=0.056\ 6$
		y=0.010 1x+3.327 6 $R^2=0.000\ 8$	y=-0.374 2x+21.184 $R^2=0.066\ 4$
	10 mm	y=-0.058 3x+4.402 4 $R^2=0.154\ 4$	y=1.747 5x+15.386 $R^2=0.047$
		y=0.059 6x-0.156 8 $R^2=0.078\ 4$	y=0.429 3x+19.386 $R^2=0.003$
	20 mm	y=0.145x-1.377 3 $R^2=0.428\ 1^{**}$	y=3.555x+16.288 $R^2=0.749\ 3^{**}$
		y=-0.004 9x+1.294 4 $R^2=0.001\ 8$	y=2.617 7x+17.55 $R^2=0.293\ 4$

注:y代表CO<sub>2</sub>排放速率,x代表温度。

CO<sub>2</sub>排放量与土壤理化性质、温度及微生物活性均有一定联系<sup>[16]</sup>。据研究报道,干湿交替会对土壤的团聚体造成破坏,而团聚体的破坏能够释放物理保护的有机质,使受物理保护的有机质被分解,释放出大量的活性有机碳氮,加速有机质的分解和矿化,进而增加CO<sub>2</sub>等温室气体的排放<sup>[17]</sup>。本研究中两种土柱起始含水量较低,为10%~15%,处于干燥状态,降雨导致湿地土壤CO<sub>2</sub>释放速率显著增加(P<0.01),而农田土壤CO<sub>2</sub>释放速率无显著差异。含水量是主导土壤呼吸的主要因素,然而,两者初始含水量无显著差异,但两者土壤有机碳含量差异明显,湿地土壤有机碳含量为90.85 g·kg<sup>-1</sup>,而农田土壤有机碳含量为8.28 g·kg<sup>-1</sup>,两者相差10倍以上,可见,在初始含水量一致情况下,土壤有机碳,特别是活性有机碳含量越高,降雨引起的激发效应越大。也就是说降雨量增加多,有机碳土壤短期碳损高,而对于低有机碳土壤(西北干旱区贫瘠土壤),土壤短期碳损影响不明显。

降水对土壤呼吸的影响存在激发效应<sup>[18]</sup>,尤其是旱地在同样降水幅度下,释放的CO<sub>2</sub>通量增加更多,这与我们的研究结果恰恰相反。本研究中,农田和湿地土壤降水可以增加CO<sub>2</sub>排放量,然而降雨量由10 mm增加至20 mm,CO<sub>2</sub>的排放量并未增加,反而减少,虽未构成显著差异,但可能说明降水量的增加,也会对土壤CO<sub>2</sub>排放有抑制的作用。根据有关报道,在干湿交替下,湿润会对土壤呼吸速率产生明显的激发效应<sup>[19]</sup>,但降水后,水在土壤中不断渗入,会填充土壤的孔隙,从而抑制土壤呼吸<sup>[20]</sup>,反而会降低CO<sub>2</sub>排放

量。Riutta等<sup>[21]</sup>研究还发现,水对湿地沼泽土壤呼吸的影响存在一个阈值,当湿地水位达到该阈值时,土壤CO<sub>2</sub>排放量会达到观测期内的最大值,而超过该阈值时则对CO<sub>2</sub>排放量没有明显影响或存在一定的抑制效应。本研究中10 mm降雨量处理产生的CO<sub>2</sub>排放量要高于20 mm组,虽未构成显著差异(P<0.01),但不排除有水分阈值存在的可能,这还需要进一步开展试验去印证,尤其是在降雨强度、频度、土壤内部结构及化学性质等方面开展相应研究,深入探讨其内在的作用机制。

## 4 结论

降雨导致湿地土壤CO<sub>2</sub>释放速率显著增加(P<0.01),而农田土壤无显著差异。在其含水量无明显差异下,湿地不同降雨处理组的CO<sub>2</sub>排放量均大于农田组,湿地土壤CO<sub>2</sub>日累积排放量降水10 mm组>降水20 mm组>对照组,土壤有机碳高的湿地土壤随降雨量增加,土壤短期碳损失高,而对低有机碳土壤(西北干旱区贫瘠土壤)短期碳损失影响不显著。降雨后农田土壤降水10 mm组CO<sub>2</sub>排放与地表温度和5 cm地温相关性极显著(P<0.01),其他各处理均未呈现显著相关。

## 参考文献:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1):7-20.
- [2] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Biogeochemistry: Soil warming and organic carbon content[J]. Nature, 2000, 408(6814):789-790.
- [3] Wang G X, Chen G D, Shen Y P. Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6):693-700.
- [4] IPCC. WGI fourth assessment report, Climate change 2007: The physical science basis[R]. Geneva: Inter-governmental Panel on Climate Change, 2007.
- [5] Karl T R, Knight R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 231-241.
- [6] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81: 417-425.
- [7] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J]. Nature, 2005, 437: 529-533.
- [8] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 719-733.

- [9] Parker L W, Miller J, Steinberger Y, et al. Soil respiration in a Chi-huahuan desert range land[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(3): 303-309.
- [10] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamic sand carbon and nitrogen cycling following rewetting of soils beneath two semi-arid plant species [J]. *Oecologia*, 2005, 142(2): 247-260.
- [11] Huxman T E, Cable J M, Ignace D D, et al. Response of net ecosystem gas exchange to a simulated precipitation pulse in a semiarid grass land: The role of native versus non-native grasses and soil texture[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 295-305.
- [12] 陈荣荣, 刘全全, 王俊, 等. 人工模拟降水条件下旱作农田土壤“Birch效应”及其响应机制[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 306-317.  
CHEN Rong-rong, LIU Quan-quan, WANG Jun, et al. Response of soil “Birch Effect” to simulated rainfalls in dry croplands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2): 306-317. (in Chinese)
- [13] 范志平, 胡亚林, 黎锦涛, 等. 干湿交替对半干旱区沙地樟子松人工林土壤 C 和 N 矿化速率影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3360-3367.  
FAN Zhi-ping, HU Ya-lin, LI Jin-tao, et al. Effects of drying-rewetting on soil C and N mineralization rates in Mongolian pine plantation in a semi-arid region [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3360-3367. (in Chinese)
- [14] 赵蓉, 李小军, 赵洋, 等. 固沙植被区两类结皮斑块土壤呼吸对不同频率干湿交替的响应[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 138-144.  
ZHAO Rong, LI Xiao-jun, ZHAO Yang, et al. CO<sub>2</sub> efflux from two biologically-crusted soils in response to drying-rewetting cycles with different frequencies in the Tengger Desert[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 138-144. (in Chinese)
- [15] 张秀敏, 陈先江, 侯扶江. 陇东典型草原不同坡向土壤呼吸对模拟降雨的短期响应[J]. 草业科学, 2014, 30(10): 1820-1824.
- ZHANG Xiu-min, CHEN Xian-jiang, HOU Fu-jiang. Temporary responses of soil respiration to precipitation in simulated typical steppe on the eastern Gansu Loess Plateau [J]. *Pratacultural Science*, 2014, 30(10): 1820-1824. (in Chinese)
- [16] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901.  
WANG Xin-yuan, LI Yu-lin, ZHAO Xue-yong, et al. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4890-4901. (in Chinese)
- [17] Park E J, Sul W J, Smucker A J M. Glucose additions to aggregates subjected to drying/wetting cycles promote carbon sequestration and aggregate stability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2758-2768.
- [18] Shi A D, Marschner P. Drying and rewetting frequency influences cumulative respiration and its distribution over time in two soils with contrasting management[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 72: 172-179.
- [19] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 342-350.  
WANG Yuan, SONG Xin-shan, WANG Jun, et al. Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 342-350. (in Chinese)
- [20] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: Interactions with soil moisture contents and soil CO<sub>2</sub> concentrations[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227(1/2): 215-221.
- [21] Riutta T, Laine J, Tuittila E S. Sensitivity of CO<sub>2</sub> exchange of fen ecosystem components to water level variation [J]. *Ecosystems*, 2007, 10(5): 718-733.