

高会议,郭胜利,刘文兆.黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子.生态学报,2011,31(18):5217-5224.

Gao H Y, Guo S L, Liu W Z. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5217-5224.

## 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子

高会议<sup>3</sup>, 郭胜利<sup>1,2,\*</sup>, 刘文兆<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

3. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥智能机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 于中国科学院长武生态试验站(始于 1984 年)采用动态密闭气室法(Li-8100, USA)于 2008 年 3 月至 2009 年 3 月监测了裸地土壤呼吸日变化、季节变化以及 0—60cm 土层的温度和含水量。研究了裸地土壤呼吸的日变化、季节变化特征及其与土壤温度和含水量之间的关系。结果表明:裸地土壤呼吸四季的日变化和季节变化均呈单峰型曲线,与气温变化趋势一致;日变化峰值出现在 14:00 左右或 16:00 左右,最低值出现在 0:00 左右或者 6:00 左右;季节变化表现为夏季最高,冬季最低,春秋两季无明显差异,年平均呼吸速率为  $0.94 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。土壤呼吸与温度具有极显著( $P < 0.01$ )的正相关关系,且可以用  $R_s = ae^{bx}$  形式的指数函数很好地拟合,其中与 5cm 深度的土壤温度相关性最好。水分对土壤呼吸的影响复杂。裸地土壤呼吸的双变量模型关系显著( $P < 0.01$ ),比相应的单变量模型更好地解释了土壤呼吸变异。

**关键词:** 裸地; 土壤呼吸; 温度; 土壤含水量

## Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau

GAO Huiyi<sup>3</sup>, GUO Shengli<sup>1,2,\*</sup>, LIU Wenzhao<sup>1,2</sup>

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China

3 Institute of Intelligent Machines, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract:** Soil is an important source of atmospheric carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ). It is an important process for soil respiration to release  $\text{CO}_2$  from biosphere to air, because understanding the rate of soil respiration and temporal and spatial fluctuation under various terrestrial ecosystem can provide the basic data to budget of global carbon balance and to estimate potential effect of global change. Soil respiration was not only influenced by environmental conditions such as temperature, humidity, and pH values, but also was controlled by biotic factors such as vegetation form, leaf area index, living weight and human reactivity. It is noted that soil temperature and moisture content are assumed to two significant environmental factors. Loess plateau located in semiarid districts of northwest of China, where soil exhibited dry and humid change alternately. Studies of  $\text{CO}_2$  emission from bare soil may help analyze annual changes in carbon (C) in soil organic matter (SOM). Therefore,  $\text{CO}_2$  emission associated with the decomposition of SOM from bare soil are important factors for assessing the C budget in agricultural fields. Studies on relationship of soil respiration change and environmental factors (soil temperature and moisture content) presented the important significance to determine the temporal and spatial change of soil respiration in this

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-424-2); 国家自然科学基金(40771125, 30871451); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(10502-Z11)

收稿日期: 2010-03-24; 修订日期: 2011-05-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

bare area. We conducted a study to monitor soil CO<sub>2</sub> emission diurnal change, CO<sub>2</sub> emission seasonal change, soil moisture, soil temperature, and assess the controlling factors of CO<sub>2</sub> emission from an unplanted soil of long-term experiment at Changwu ecological station of Chinese Academy of Science, China. *In situ* soil CO<sub>2</sub> emissions from March 2008 to March 2009 were measured with an IRGA CO<sub>2</sub> analyzer (Li-COR 8100, Li-COR Corp., Lincoln, NE) following the dynamic closed chamber method. The CO<sub>2</sub> diurnal and seasonal change in the bare soil followed single peak trend, same as the change of soil temperature. The highest value of diurnal change appeared at 14:00 or 16:00, and the lowest value appeared at 0:00 or 6:00. The CO<sub>2</sub> flux increased in summer and decreased in winter. The average of CO<sub>2</sub> emission during the study period was 0.94 μmolCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. There were significant positive correlations between the CO<sub>2</sub> flux and soil temperature ( $P < 0.01$ ). The regression equation of  $R_s = ae^{bT}$  fit the relationship between the CO<sub>2</sub> flux and soil temperature very well, especially in 0—5 cm soil depth. Unlike soil temperature, apparent relationships between CO<sub>2</sub> flux and soil moisture were not observed. Bi-variable model  $R_s = ae^{bT}W$  with soil temperature ( $T$ ) and soil moisture ( $W$ ) could explain variation of soil respiration much better than mono-variable model.

**Key Words:** bare fallow; soil respiration; temperature; soil moisture

土壤呼吸是生物圈向大气释放其固定 CO<sub>2</sub> 的主要途径之一<sup>[1]</sup>。了解不同陆地生态系统土壤呼吸速率及其时空波动,对于全球碳素平衡预算和估计全球变化的潜在效应是最为基本的数据<sup>[2-3]</sup>。土壤呼吸不仅受到温度、湿度、pH 值等环境条件的影响,而且受到植被类型、叶面积指数、根系生物量等生物因子和人类活动的综合影响。其中土壤温度和水分含量是影响土壤呼吸最主要的环境因子,但土壤温度、土壤水分与土壤呼吸的关系在不同的研究中有很大的差异性。Jia 等<sup>[4]</sup> 研究表明,土壤呼吸与土壤温度呈正相关关系;杨兰芳等<sup>[5]</sup> 研究指出,裸地土壤呼吸与温度呈极显著指数与线性相关,线性相关性略高于指数相关系数;在持水量范围内,土壤呼吸和水分含量呈正相关关系。孟祥利等<sup>[6]</sup> 人为,土壤呼吸与土壤水分呈显著正相关,与温度没有显著的相关关系;韩广轩等<sup>[2]</sup> 则认为土壤呼吸与土壤含水量呈负相关关系;Reth 等<sup>[7]</sup>、陈全胜等<sup>[8]</sup>、李虎等<sup>[9]</sup> 研究表明,土壤含水量与土壤呼吸之间相关性不明显。

土壤呼吸主要由根系呼吸和土壤微生物呼吸两部分构成,且土壤微生物呼吸约占土壤总呼吸的 40%—70%<sup>[10-11]</sup>。裸地土壤呼吸近似于土壤异氧呼吸,主要与土壤微生物呼吸密切相关。因此,研究裸地土壤呼吸,不仅对区分测量或估算根系呼吸,而且对深入理解土壤呼吸变化具有重要的意义。目前国内外关于裸地土壤呼吸及其环境影响的研究仍较少。此外,黄土高原地区地处西北半干旱地区,土壤干湿变化大。研究该地区裸地土壤呼吸变化与土壤水分和温度等因素的关系对揭示区域土壤呼吸时空变化具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地自然条件

长期试验在长武站(中国科学院生态研究网络 CERN 台站)进行,该区位于陕西省长武县(东经 107°40′,北纬 35°12′),海拔 1200 m。属于典型的黄土旱塬区,半干旱湿润性季风气候。1984—2007 年间年均降水量为 586 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm。7—9 月降水量占年总量的 49% 左右。年平均气温 9.4℃,大于 10℃ 积温为 3029℃,年日照时数为 2230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ/cm<sup>2</sup>,无霜期 171d。土壤为粘壤质黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,土质疏松。布设试验前 0—20cm 耕层土壤含有有机碳 6.50g/kg,全氮 0.62 g/kg,碱解氮 37.0mg/kg,速效磷 3.0 g/kg,速效钾 129.3mg/kg, CaCO<sub>3</sub> 10.5%, pH8.4 试验地 N、P 含量较低,钾素丰富,呈微碱性反应。

### 1.2 试验设计与管理

试验始于 1984 年 9 月,11 种轮作方式与 7 种施肥制度(不完全组合),共 36 个处理。3 次重复,随机区组排列。小区面积 10.3m × 6.5m,小区间距 0.5m,区组间距和周边宽各 1.0m。本研究选取裸地处理(F)作为

研究对象,田间管理同大田。

### 1.3 土壤呼吸的测定

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)。测定前在每个小区内安置测定基座(去除基座内的一切活体),为了减少安置测定基座对土壤系统的破坏,在测定基座安置 24h 后再进行测定,从而避免了由于安置气室基座对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动<sup>[12-14]</sup>。

分别于春季(2008-04-23)、夏季(2008-06-21)、秋季(2008-10-01)、冬季(2008-11-18)以 24h 为 1 周期,每间隔 2h 测定 1 次土壤呼吸,重复 2 次,取平均值,以获取四季土壤呼吸日变化动态。

2008 年 3 月—2009 年 3 月,每月的 10 号和 20 号前后选择晴好天气,在 9:00—11:00 进行田间测定,每试验小区重复两次,每处理共计 6 次重复;6 次平均作为当日测定的土壤呼吸速率值。

### 1.4 环境因子的测定

在进行土壤呼吸测定的同时,利用中子仪进行测定 0、10、20、30、40、50、60cm 的土壤含水量,每个处理 3 次重复;5、15cm 土壤含水量为相邻两层次土壤含水量的平均值。土壤温度由长武生态试验站全自动气象观测场获取。

### 1.5 试验数据处理

统计分析采用 SAS8.1(SAS Inst., 1999)软件和 Excel2007 进行;用 Sigmaplot10.0 软件分析土壤呼吸和温度、土壤湿度间的关系,分别拟合土壤呼吸对温度的单因子响应模型,土壤呼吸对土壤湿度的单因子响应模型,以及土壤呼吸对温度和湿度的双因子响应模型。采用指数方程模型  $R = ae^{bT}$  (式中,  $R$  为土壤呼吸,  $T$  为温度,  $a$ 、 $b$  为常数)模拟土壤呼吸与温度的关系;采用  $\Theta = (\theta - \theta_{wp}) / (\theta_{fc} - \theta_{wp})$  (其中,  $\Theta$  为土壤呼吸,  $\theta$  为土壤含水量,  $\theta_{wp}$  为萎焉系数,  $\theta_{fc}$  为田间持水量)模拟土壤呼吸速率与土壤水分含量的关系;采用  $R = ae^{bT}W^c$  ( $R$  为土壤呼吸,  $T$  为温度,  $W$  为土壤含水量,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数)来分析水分和温度对土壤呼吸变化的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸日变化特征

长期裸地处理土壤呼吸的日变化呈单峰趋势(图 1),与近地面气温和地温变化格局一致。春季,峰值( $1.4 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 15:30,最低值( $0.01 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 0:00—1:00 之间;夏季,峰值( $2.13 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 16:30,最低值( $1.06 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 6:00 左右;秋季,峰值( $1.01 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 14:00 左右,最低值( $0.41 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )也出现在 6:00 左右;冬季,峰值( $0.56 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 14:00 左右,最低值( $0.13 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )出现在 22:00 左右。一天中土壤呼吸速率极值出现的时间与近地面气温和地温变化极值出现的时间具有较高的一致性。

### 2.2 土壤呼吸季节变化特征

土壤呼吸具有明显的季节变化(图 2)。整个测定过程中,土壤呼吸速率平均值为  $0.94 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,波动范围为  $0.29—1.82 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2008 年 3 月开春后,气温回升,土壤水分含量较高,土壤微生物活性增强,土壤有机质分解加快,土壤呼吸放速率增强,4 月中旬达到第一个峰值( $1.13 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );随后气温减低,土壤呼吸速率随之降低;5 月中旬,气温回升,土壤呼吸速率也逐步升高,在 7 月中旬出现了一年的最高值( $1.82 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),7 月下旬到 9 月,温度变化不大,土壤呼吸速率相对稳定( $1.4—1.6 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。10 月温度迅速降低,土壤呼吸速率下降;11 月中旬到翌年 2 月,由于受低温的限制,土壤呼吸速率稳定地维持在一年的最低水平( $0.30 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

### 2.4 土壤呼吸速率与环境因素的关系

#### 2.4.1 土壤呼吸速率与温度

采用指数方程模型( $R = ae^{bT}$ )分析土壤呼吸与温度的关系。研究发现,裸地土壤呼吸速率与气温、不同土层地温的关系可以用指数方程得到很好的拟合( $P < 0.01$ )。气温和不同深度土壤温度与土壤呼吸速率显著

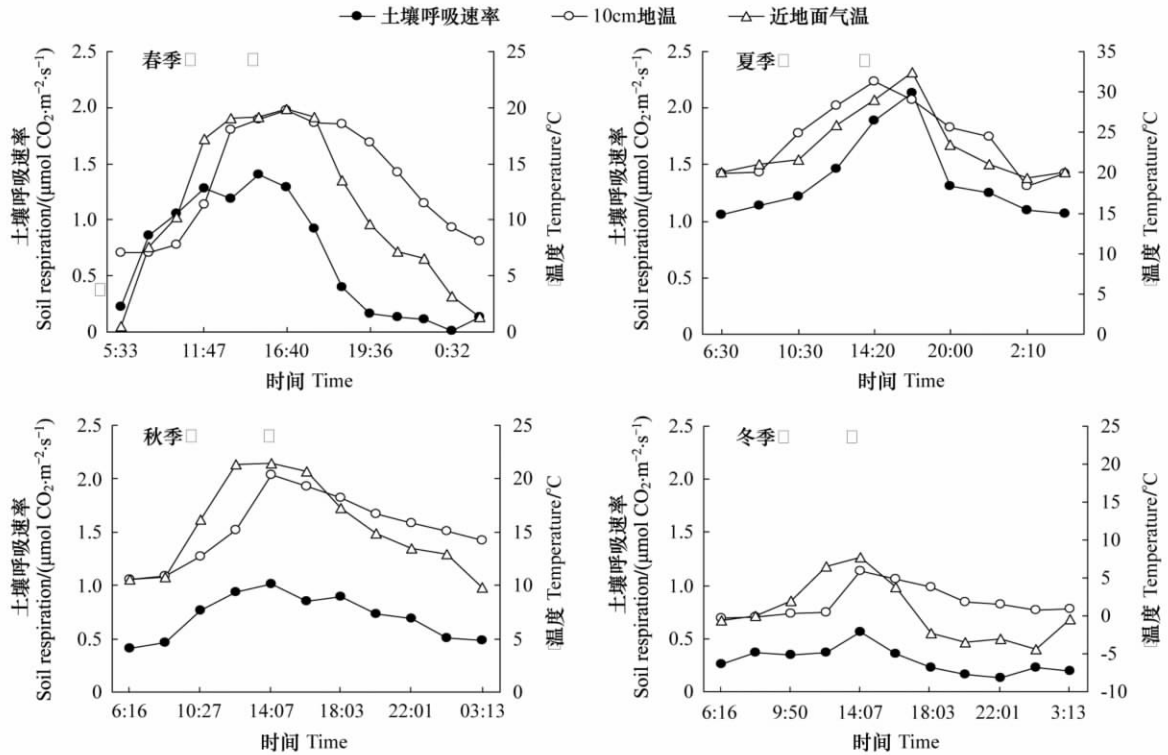


图1 裸地土壤呼吸速率日变化  
 Fig. 1 Diurnal variation of soil respiration rate under bare fallow

相关(表1)土壤呼吸速率与5cm深度地温指数相关最好。与气温、10、15、20、40cm和60cm地温的指数相关均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

2.4.2 土壤呼吸速率与土壤湿度

采用( $\theta = (\theta - \theta_{wp}) / (\theta_{fc} - \theta_{wp})$ )来分析土壤呼吸速率与土壤水分含量的关系。研究发现,只有40、60cm土壤水分对土壤呼吸速率的影响达到显著性水平( $P < 0.05$ )其他土层含水量表现不明显(表1)土壤水分对土壤呼吸变化的解释能力为11%—41%。Markus等<sup>[15]</sup>研究表明,单变量模型的解释能力很难超过80%。

2.4.3 土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度

实际上,土壤温度总是和土壤水分一起对呼吸速率的变化产生影响,两者之间存在明显的交互作用。本研究采用以下模型描述水分和温度对土壤呼吸变化的影响<sup>[16]</sup>

$$R = ae^{bT}W^c$$

式中  $R$  为土壤呼吸速率,  $T$  为温度,  $W$  为土壤水分含量  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

本文利用5、10、15、20、40、60cm土层的土壤温度和土壤水分含量与土壤呼吸依据公式  $R = ae^{bT}W^c$  建立了土壤呼吸速率与温度和水分的双变量关系(表2)。

与单因子模型相比,复合模型的决定系数( $R^2$ )均显著提高,复合模型的决定系数随土层深度的增加而减小,15cm土层水分和土壤温度复合模型的决定系数最大(表2)表明0—15cm土壤温度和水分的变化能够解释85%的土壤呼吸变异<sup>[16]</sup>。

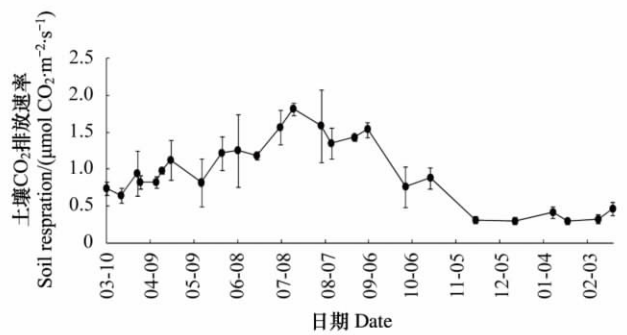


图2 裸地土壤呼吸速率的季节变化  
 Fig. 2 Changes in soil respiration rate under bare fallow

表 1 不同土层深度土壤呼吸速率(  $R$  )与温度(  $T$  )和土壤水分(  $W$  )的关系

Table 1 Correlation coefficients of soil respiration with temperature and water contents

处理 Treatment	关系式 Function	$R_T^2$	$Q_{10}$	关系式 Function	$R_w^2$
气温 Air temperature	$R = 0.4842e^{0.0558 T}$	0.622 **	1.747		
土层深度 Soil depth	$R = 0.4640e^{0.0525 T}$	0.586 **	1.690	$R = 3.05W^2 + 1.07W + 0.47$	0.14
	$R = 0.4675e^{0.0528 T}$	0.566 **	1.696	$R = 0.76W^2 - 1.10W + 1.78$	0.14
	$R = 0.4684e^{0.0531 T}$	0.542 **	1.701	$R = 0.69W^2 - 1.29W + 1.00$	0.13
	$R = 0.4704e^{0.0532 T}$	0.513 **	1.702	$R = 0.57W^2 - 1.34W + 1.20$	0.11
	$R = 0.4798e^{0.0539 T}$	0.448 **	1.714	$R = 3.16W^2 - 5.14W + 2.44$	0.41 *
	$R = 0.5002e^{0.0527 T}$	0.379 **	1.694	$R = 4.37W^2 - 7.43W + 3.51$	0.32 *

### 3 讨论

#### 3.1 休闲或裸地土壤呼吸空间变异性分析

裸地或休闲土壤呼吸速率反映了去除根系呼吸条件下土壤呼吸的变化特征。除土壤差异外,各地区土壤温度和湿度是调控休闲或裸地土壤呼吸的主要因素。裸地土壤呼吸速率西部高原(青藏高原)较高,东部平原(华北平原)较低,东北黑土略高于南方淋溶土(表3);本地区土壤呼吸速率值与同纬度的黄淮海基本相同,处于中间水平。这一特征与我国SOC含量空间分布表现为西部低,东部高,水田高,旱地低相一致的<sup>[17]</sup>。

表 2 土壤呼吸速率与温度、水分的双变量模型

Table 2 Two-variable about soil respiration model and soil temperature, soil moisture

土层深度/cm Soil depth	关系式 Function	$R^2$
5	$R = 0.2379e^{0.0675 T} W^{0.2058}$	0.8238 **
10	$R = 0.3082e^{0.0592 T} W^{0.1124}$	0.8276 **
15	$R = 0.0539e^{0.0698 T} W^{0.6379}$	0.8541 **
20	$R = 0.1343e^{0.0712 T} W^{0.3201}$	0.8370 **
40	$R = 0.1709e^{0.0726 T} W^{0.2404}$	0.7897 **
60	$R = 2.0373e^{0.0787 T} W^{-0.6348}$	0.7417 **

表 3 不同地区休闲或裸地土壤呼吸速率的比较

Table 3 Soil respiration rate in fallow or bare land across China

地点 Site	环境条件 Environmental conditions	测定时间 Time	土壤呼吸速率 Soil respiration		参考文献 Reference
			范围 Range	均值 Mean	
西藏拉萨	年均降雨量 500mm, 土壤 pH 值 7.0—8.0, 有机质含量 1.0—2.0%	5—11 月	625—833	—	[18]
河南安阳	年均降雨量 700mm, 年均温 14℃, 有机质 0.68g/kg	小麦—玉米轮作期间(全年)	—	54.91	[19]
河北邯郸	年均降雨量 514.3mm, 年均温 13.2℃, 有机质为 2.9 g/kg	全年	62.5—359.7	198.7	[9]
黑龙江海伦站	有机碳 27.96g/kg, pH 值为 7.02	大豆整个生育期(盆栽试验)	40.4—53.8	45.9	[20]
贵州省贞丰县	年降雨量 1100mm, 年均温 15.8℃, pH 值为 6.5—8.0	2007 年 4 月 22—24	—	569	[21]
江苏南京	有机碳含量 4.9g/kg, pH 值 5.8	玉米(盆栽试验)	12.5—132	—	[5]
江苏苏州	年降雨量 1100mm, pH 值 5.6, 有机碳含量 21.8—24.4g/kg	稻-油轮作	44.7—92.4	—	[22]
桃源生态站	年降雨量 1448mm, 年均温 16.5℃, 有机质 32.0 g/kg	10 月中旬至翌年 4 月	52—398	—	[23]
西安长延堡	暖温带季风气候	6—7 月	254—294	274.5	[24]
陕西长武	详见试验地自然条件	3 月至翌年 2 月	47.5—324.4	185	本研究

裸地或休闲地的土壤呼吸受到经纬度、海拔、降雨量等因素的影响。高纬度的东北黑土休闲地土壤呼吸

明显低于低纬度的河北、河南地区休闲地土壤呼吸;高海拔的西藏地区土壤呼吸明显高于低海拔的东部地区,且随着海拔的降低,土壤呼吸速率呈降低趋势;陕北干旱地区土壤呼吸速率略低于雨水充足的西安地区,降雨量大的南方地区明显高于北方地区。但总的来说,经纬度、海拔、降雨量等因素是通过温度、湿度影响土壤呼吸强弱的。

### 3.2 土壤呼吸对水热条件差异性的响应

本研究中裸地土壤呼吸速率与 0—60cm 不同土层的温度均达到极显著相关,且可以用指数函数很好地模拟,此结论与多数室内外的研究结果相吻合<sup>[25]</sup>。5cm 地温同土壤呼吸速率相关性最好,而戴万宏等<sup>[26]</sup>在陕西杨凌壤土研究表明,土壤呼吸速率与 10cm 地温的相关性最好。这可能是因为表层土壤微生物活动较为旺盛,对土壤呼吸的贡献较大,因而地下 5cm 温度能较准确地反映土壤微生物活动的环境条件,而杨陵壤土温度较高(海拔 550m,年均温为 12.9℃)地下 10cm 温度能够很好地反映土壤微生物活动的环境条件<sup>[27]</sup>。

$Q_{10}$  值是土壤呼吸对温度变化的敏感程度,即温度每升高 10℃,土壤呼吸增加的倍数。 $Q_{10}$  值是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的重要指标,这一指标也反映了温度变化后,土壤呼吸作用的变化规律,对于了解未来气候变化条件下生态系统中碳排放通量的变异规律具有一定的参考意义。本研究结果表明,不同的土层深度条件下, $Q_{10}$  不同。通过计算等到本实验点不同土层深度(气温、5、10、15、20、40、60cm)在全年的土壤呼吸  $Q_{10}$  值为 1.69—1.747,符合 Raich 和 Schlesinger<sup>[1]</sup> 根据文献所统计的全球尺度下的  $Q_{10}$  值。本研究中 10cm 土壤  $Q_{10}$  (1.70) 与严俊霞等对裸地土壤呼吸研究结果一致(1.70)。在 Raich 和 Schlesinger 研究的基础上,Chen 等<sup>[28]</sup>重新分析了这些数据,发现  $Q_{10}$  具有明显的地带性,温带和热带-亚热带的变化范围分别是 1.1—14.2、1.4—4.6,平均值分别为  $2.7 \pm 1.7$ 、 $2.2 \pm 0.9$ 。本研究区属于温带,所得到的裸地  $Q_{10}$  均在以上研究范围之内,且本研究发现,土壤呼吸的  $Q_{10}$  随着土壤深度的增加而增加,这与 Fierer 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致,这主要是由于随着土壤深度的增加土壤温度的变化幅度减少而造成的,所以在比较和评价土壤呼吸对温度的敏感性时,需要注意在同一土壤深度层次下进行。

土壤水分对土壤呼吸的影响比较复杂,不同的生态系统中水分对土壤呼吸的影响方向和程度有很大的差别。在土壤水分含量充足、不成为限制因子的条件下,土壤呼吸与土壤温度呈正相关;而在水分成为限制因子的干旱、半干旱地区,土壤呼吸受到水分和温度的共同影响<sup>[30-31]</sup>。本试验中结果显示:裸地土壤呼吸速率与 40cm、60cm 土壤含水量关系显著,其他土层含水量相关性不显著(表 1),这与 Kucera 和 Kirkham 等<sup>[32]</sup>研究结果不同,与 Zhang L H 等<sup>[14]</sup>、高艳红等<sup>[33]</sup>研究结果相近。其原因是本研究处于干旱半干旱地区,土壤水分是土壤植被和生物的一个重要的限制因子。

与土壤呼吸和土壤温度、水分的单变量拟合系数相比,土壤呼吸和土壤温度、水分变量函数关系的决定系数均有一定程度的提高。把土壤水分因子增加到土壤呼吸与土壤温度的函数关系中可以提高土壤呼吸的预测准确性。这一特点与许多研究者的结果一致<sup>[34-37]</sup>。用土壤包括土壤温度和水分的关系可以改善土壤呼吸的预测能力,可以利用土壤温度和水分数据,来准确进行土壤  $\text{CO}_2$  通量的季节变化模拟。

## 4 结论

1) 长期裸地土壤呼吸速率具有明显的日变化和季节变化格局。日变化呈单峰趋势,峰值出现在 14:00 左右或者 16:00 左右,最低值出现在凌晨 6:00 或者 0:00 前后。季节变化表现为夏季高( $1.58 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),冬季低( $0.36 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),春秋居,且两季节无明显差异;全年均为  $0.94 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,波动范围为  $0.29—1.85 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。年排放量为  $1305 \text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2) 土壤呼吸速率与温度呈极显著正相关关系,且可以用  $R = ae^{bT}$  ( $a$ 、 $b$  为常数) 形式的指数函数很好地拟合( $R^2$  范围为 0.379—0.622,  $P < 0.01$ ),其中土壤温度中以 5cm 地温的相关性最好( $R^2 = 0.586^*$ )。土壤呼吸速率与 40cm 土层土壤水分相关关系最好( $R^2 = 0.406^*$ )。但双变量关系模型  $R = ae^{bT}W^c$  达到极显著水平,明显高于其单因素模型的决定系数。

## References:

- [ 1 ] Raich J W , Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* ,1992 44 B: 81-99.
- [ 2 ] Han G X , Zhou G S , Xu Z Z. Seasonal dynamics of soil respiration and carbon budget of maize ( *Zea mays* L. ) farmland ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 2009 ,17( 5) : 874-879.
- [ 3 ] Schaefer D A , Feng W T , Zou X M. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtropical forest of southwestern China. *Soil Biology & Biochemistry* ,2009 41: 1000-1007.
- [ 4 ] Jia B R , Zhou G S , Wang F Y , Wang Y H , Weng E S , Effects of grazing on soil respiration of leymus chinensis steppe. *Climatic Change* ,2007 , 82 211-223.
- [ 5 ] Yang L F , Cai Z C. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates. *Acta Pedologica Sinica* ,2005 42( 1) : 9-15.
- [ 6 ] Meng X L , Chen S P , Wei L , Lin G H. Temporal and spatial variations of soil respiration in an *Artemisia ordosica* shrub land ecosystem in Kubuqi Desert. *Environmental Science* ,2009 ,30( 4) : 1152-1158.
- [ 7 ] Reth S , Reichstein M , Falge E. The effect of soil water content , soil temperature , soil pH-value and the root mass on soil CO<sub>2</sub> efflux-A modified model. *Plant and Soil* 2005 268: 21-23.
- [ 8 ] Chen Q S , Li L H , Han X G , Yan Z D , Wang Y F , Yuan Z Y. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica* 2003 27( 2) : 202-209.
- [ 9 ] Li H , Qiu J J , Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration. *Transactions of the CSAE* 2008 24( 4) : 14-20.
- [ 10 ] Hanson P J , Gundersen C A. Root carbon flux: measurements versus mechanisms. *New Phytologist* ,2009 ,184( 1) : 4-6.
- [ 11 ] Zhou X H , Luo Y Q , Gao C , Verburg P S J , Arnone J A , Darrouzet-Nardi A , Schimel D S. Concurrent and lagged impacts of an anomalously warm year on autotrophic and heterotrophic components of soil respiration: a deconvolution analysis. *New Phytologist* ,2010 ,187: 184-198.
- [ 12 ] Gao H Y , Guo S L , Liu W Z , Che S G. Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* ,2009 29( 5) : 2551-2559.
- [ 13 ] Gao H Y , Guo S L , Liu W Z , Che S G. Effects of Nitrogen rates on soil respiration in winter wheat cropping system in semi-arid regions on Loess Plateau. *Environmental Science* 2010 31( 2) : 390-396.
- [ 14 ] Zhang L H , Chen Y N , Li W H. A biotic regulator of soil respiration in desert ecosystems. *Environ Geol* ,2009 57: 1855-1864.
- [ 15 ] Markus R , Janssen S , Andrew C A , Does the temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter depend upon water content , soil horizon , or incubation time?. *Global Change Biology* 2005 ,11( 3) : 1754-1767.
- [ 16 ] Qi L B , Fan J , Shao M A , Wang W Z. Seasonal changes in soil respiration under different land use patterns in the water win erosion crisscross region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* 2008 28( 11) : 5428-5436.
- [ 17 ] Wang S Q , Zhou C H , Li K R , Zhu S L , Huang F H. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica* 2000 55( 5) : 533-544.
- [ 18 ] Zhang X Z , Liu Y F , Zhong H P , Ou Y H. Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in The Tibetan Plateau. *Resources Science* , 2003 ,25( 5) : 103-107.
- [ 19 ] Zhang G M , Guo L P , Shi P J , Lin E D , Wang J A , Miao S Y. A study on the characteristics of CO<sub>2</sub> emission of winter-wheat and summer-corn in the ecological system of upland soil. *Journal of Beijing Normal University( Natural Science)* 2007 43( 4) : 457-460.
- [ 20 ] Qiao Y F , Han X Z , Miao S J. Dynamic changes of soil organic carbon and nitrogen in black soil under long-term fertilization. *Chinese Journal of Soil Science* ,2008 39( 3) : 545-548.
- [ 21 ] Zhou J , Cui Y C , Liu Y H , Li Y Y , Ding F J , Yu L F. Study on soil respiration characteristic of Karst Degeneration vegetation recovery procedure in Spring. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2008 22( 2) : 195-198.
- [ 22 ] Zheng J F , Zhang X H , Pan G H , Li L Q. Diurnal variation of soil basal respiration and CO<sub>2</sub> emission from a typical paddy soil after ricer harvest under long term different fertilizations. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 2006 ,12( 4) : 485-494.
- [ 23 ] Ren X E , Wang Q X , Tong C L , Wu J S , Wang K L , Zhu Y L , Li Z J , Du-Bian Z X , Tang G Y. Subtropical paddy ecosystem estimates of soil respiration. *Chinese Science Bulletin* ,2007 52( 13) : 1548-1553.
- [ 24 ] Cai X W , Zhao J B. Change and the influence factors of the amount of CO<sub>2</sub> released from soil in Xi'an area , Shaanxi. *Arid Land Geography* , 2005 28( 3) : 316-319.
- [ 25 ] Meng L , Ding W X , Cai Z C , Qin S W. Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization. *Advances in Earth Science* 2005 20( 6) : 687-692.
- [ 26 ] Dai W H , Wang Y Q , Hang Y , Liu J , Zhao L. Study on CO<sub>2</sub> emissions in agri-ecosystems. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* ,2004 31( 12) : 1-7.
- [ 27 ] Hanson P J , Edwards N T , Garten C T , Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and

- observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115-146.
- [28] Chen H, Harmon M E, Griffiths R P, Hicks W. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138: 51-64.
- [29] Fierer N, Allen A S, Schimel J P, Holden P A. Controls on microbial CO<sub>2</sub> production: A comparison of surface and subsurface soil horizons. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1322-1332.
- [30] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476.
- [31] Han G X. Study on Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Simulation in a Maize Field. Dissertation, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2007, 78-85.
- [32] Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, 52, 912-915.
- [33] Gao Y H, Zhang Z S, Liu L C, Jia R L. Effects of heat and water factors on soil respiration in desert area. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5995-6001.
- [34] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667-677.
- [35] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO<sub>2</sub> efflux in a Coniferous Forest in the Sierra Nevada Mountains. *Plant and Soil*, 2001, 237: 13-23.
- [36] Gaumont G, Andrew B T, Griffins T J. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a Boreal Aspen Stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 220-235.
- [37] Janssens I, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q<sub>10</sub> of soil respiration in a Beech Forest. *Global Change Biology*, 2003, 9: 911-918.

#### 参考文献:

- [2] 韩广轩,周广胜,许振柱. 玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节动态与碳收支初步估算. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 874-879.
- [5] 杨兰芳,蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响. *土壤学报*, 2005, 42(1): 9-15.
- [6] 孟祥利,陈世苹,魏龙,林光辉. 库布齐沙漠油蒿灌丛土壤呼吸速率时空变异特征研究. *环境科学*, 2009, 30(4): 1152-1158.
- [8] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,阎志丹,王艳芬,袁志友. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 202-209.
- [9] 李虎,邱建军,王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 14-20.
- [10] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992: 10 23-57.
- [12] 高会议,郭胜利,刘文兆,车升国. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸机土壤碳动态. *生态学报*, 2009, 29(5): 2551-2559.
- [13] 高会议,郭胜利,刘文兆,车升国. 施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响. *环境科学*, 2010, 31(2): 390-396.
- [16] 齐丽彬,樊军,邵明安,王万忠. 黄土高原水蚀交错不同土地利用类型土壤呼吸季节变化及环境驱动. *生态学报*, 2008, 28(11): 5428-5436.
- [17] 王绍强,周成虎,李克让,朱松丽,黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [18] 张宪洲,刘允芬,钟华平,欧阳华. 西藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征. *资源科学*, 2003, 25(5): 103-107.
- [19] 张国明,郭萍,史培军,林而达,王静爱,缪驰远. 农田土壤生态系统冬小麦夏玉米轮作 CO<sub>2</sub> 排放特征研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(4): 457-460.
- [20] 乔云发,韩晓增,苗淑杰. 长期定量施肥对黑土呼吸的影响. *土壤通报*, 2007, 38(5): 887-890.
- [21] 邹军,崔迎春,刘延惠,李媛媛,丁访军,喻理飞. 退化喀斯特植被恢复过程中春季土壤呼吸特征研究. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 195-198.
- [22] 郑聚峰,张旭辉,潘根兴,李恋卿. 水稻土基底呼吸与 CO<sub>2</sub> 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 485-494.
- [23] 任秀娥,王勤学,童成立,吴金水,王克林,朱咏莉,林泽建,渡边正孝,唐国勇. 亚热带稻田生态系统土壤呼吸的估算. *科学通报*, 2007, 52(13): 1548-1553.
- [24] 蔡小微,赵景波. 西安长延堡夏季土壤 CO<sub>2</sub> 释放量的变化及影响因素. *干旱区地理*, 2005, 28(3): 316-319.
- [25] 孟磊,丁维新,蔡祖聪,钦绳武. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 687-692.
- [26] 戴万宏,王益权,黄耀,刘军,赵磊. 农田生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 释放研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(12): 1-7.
- [33] 高艳红,张志山,刘立超,贾荣亮. 水热因子对沙漠地区土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2009, 29(11): 5995-6001.