

文章编号: 1003-7578(2013)01-075-06

# 宁夏黄土丘陵区冬小麦农田土壤呼吸特征及影响因素分析\*

董立国, 许浩, 张源润, 蔡进军, 潘占兵, 马璠

(宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002)

**提 要:** 土壤呼吸是陆地碳循环研究的关键环节, 是大气 CO<sub>2</sub> 的重要来源, 文中以冬小麦农田为研究对象, 利用 ACE 土壤呼吸自动监测系统, 研究了冬小麦农田土壤呼吸、土壤温度、土壤水分和光合有效辐射的变化特征、相互关系以及碳释放量。结果表明: 1) 土壤呼吸日变化呈现“单峰型”, 最大值出现在 13:00 左右, 最小值出现在夜间; 2) 土壤呼吸日变化表明土壤呼吸与土壤温度(0-10cm) 和光合有效辐射呈显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 与土壤水分的关系不确定; 3) 土壤呼吸季节变化表明土壤呼吸与土壤温度呈显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 与土壤水分和光合有效辐射无显著相关关系; 4) 冬小麦农田碳释放量  $168 \text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

**关键词:** 宁夏黄土丘陵区; 冬小麦农田; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤水分; 光合有效辐射

中图分类号: S152

文献标识码: A

土壤呼吸是陆地碳循环研究的关键环节, 是大气 CO<sub>2</sub> 的重要来源, 全球通过土壤呼吸排放到大气中的 CO<sub>2</sub> 约为 68 ~ 100 PgC/a, 是全球化石燃料碳释放量的 10 倍左右<sup>[1]</sup>。农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 研究农田生态系统土壤呼吸对全球碳循环具有重要意义, 刘爽等(2010)<sup>[2]</sup>采用动态气室法研究了不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素; 代快等(2010)<sup>[3]</sup>采用碱吸收法研究了不同耕作措施温度对土壤呼吸的影响; 付刚等(2010)<sup>[4]</sup>利用 LI-8100 研究藏北高寒放牧草甸的生态系统呼吸和土壤呼吸特征; 王义祥等(2010)<sup>[5]</sup>利用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统研究了福州郊区柑橘果园翻耕和生草两种干扰措施下土壤呼吸的变化规律; 周洪华等(2010)<sup>[6]</sup>利用 LI-8100 研究了不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素; 王建林等(2010)<sup>[7]</sup>利用 LICOR-6400 便携式光合作用仪连接 6400-09 土壤叶室研究了灌溉量对灌浆期麦田土壤呼吸的影响; 宁夏黄土丘陵区地处我国黄土高原的腹地, 是黄河上游的主要水源涵养区和黄土高原水土流失重点治理区, 也是干旱、半干旱的旱作农业区和回族聚居区, 农业是该地区国民经济的重要组成部分和支柱。文中以宁夏黄土丘陵区冬小麦农田为研究对象, 采用 ACE 土壤碳通量测定系统, 研究冬小麦土壤呼吸变化规律, 并进行土壤呼吸与影响因子间的相关分析以及进行初步的碳释放量估算, 旨在为黄土丘陵区农田土壤碳释放等研究提供一定的研究基础。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于彭阳县城东北 21km 处的中庄村和草川村, 属于典型的温带大陆性气候, 地貌类型属黄土高原腹部梁峁丘陵地。年平均降水量 433.6mm (22 年) 左右, 分明显的旱季和雨季, 其中 50 ~ 75% 集中在 6 ~ 9 月份, 3 ~ 5 月的降水量, 只有全年降水量的 10 ~ 20%。年平均气温 7.4℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的积温为 2200 ~ 2750℃, 地面平均气温 8 ~ 9℃, 7 月最高, 平均为 22 ~ 23℃; 1 月最低, 平均为 -8℃ 左右。一般 11 月中下

\* 收稿日期: 2012-1-7; 修回日期: 2012-2-7。

基金项目: 国家自然科学基金(40861028) 和宁夏自然科学基金(NZ0967, NZ1061) 资助。

作者简介: 董立国(1980-), 男, 助理研究员。主要从事系统生态学、植物栽培及可持续发展等研究工作。

E-mail: dlq0303@163.com

通讯作者: 张源润

甸土壤结冻 至翌年 3 月初开始解冻。日照时数为 2200 ~ 2700 小时,日照百分率为 50 ~ 65% ,一年之中 6 月日照时数最多 9 月日照时数最少。近 10 年的干燥度为 1.40 ~ 3.04(可能蒸散量/降雨量)。无霜期 140 ~ 160 天。主要气象灾害有干旱、霜冻、冰雹等。干旱是示范区发生次数多、影响面广、危害最严重的农业气象灾害。农田种植以粮食作物为主,主要有冬麦、豌豆、玉米、糜子、马铃薯等,油料作物主要以胡麻为主,饲料作物主要以紫花苜蓿为主。

### 1.2 试验地概况

2010 年观测点(冬小麦农田):2007 年(玉米收获后)测定土壤 pH 为 8.5,全盐:0.346g/kg,有机质 13.60g/kg,全量氮 0.99 g/kg,全量磷 0.74g/kg,全量钾 19.04g/kg,速效氮 69.4mg/kg,速效磷 9.3mg/kg,速效钾 137mg/kg。2008 年种植马铃薯 2009 年种植胡麻 2010 年种植冬小麦。

2011 年观测点(冬麦地):pH 为 8.7,全盐:0.48g/kg,有机质 13.90g/kg,全量氮 1.02g/kg,全量磷 0.72g/kg,全量钾 17.20g/kg,速效氮 56.0mg/kg,速效磷 6.7mg/kg,速效钾 160mg/kg。

### 1.3 研究方法与数据分析

土壤呼吸利用英国 ADC 公司生产的 ACE 土壤碳通量自动测定仪从 2010 年 4 月 - 2010 年 11 月和 2011 年 4 月 - 2011 年 11 月每月测定一次土壤呼吸,每次最少测定 24h。试验开始前将仪器配套钢圈(直径 30cm 高 8cm)垂直压入土壤 4cm,保证钢圈与土体无缝隙结合,同时剪去圈内冬小麦地上部分以及地表枯枝落叶,安装 ACE 土壤碳通量自动测定仪,将土壤水分和土壤温度探头插入土壤,保持土壤深度为 5cm 连接线缆,启动仪器,设置仪器单次测定周期为 30 分钟或者 60 分钟。

每次去掉第 1 时间(前几次)测定土壤呼吸,土壤温度,土壤水分等值,保留连续 24 小时的测定数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦农田土壤呼吸和影响因子日变化规律

选择 2011 年 6 月连续 12 天所测数据中晴天的数据(一天)(图 1),由图 1 得出:土壤呼吸、光合有效辐射、土壤表层温度呈现相似的变化规律,呈现"单峰型"变化规律,土壤水分日变化规律不明显。土壤呼吸、光合有效辐射最大值出现在 13:00,分别为  $3.91 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1808 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,土壤呼吸最小值出现在 23:00,为  $0.64 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,光合有效辐射在夜间均为 0;土壤温度最大值相对于土壤呼吸具有一定的延后性,最大值出现在 16:00,为  $31^\circ\text{C}$ ,最小值出现在 6:00,为  $15^\circ\text{C}$ 。由图可以得出土壤呼吸与土壤水分相关性较小,与土壤温度和光合有效辐射具有一定的相关性。

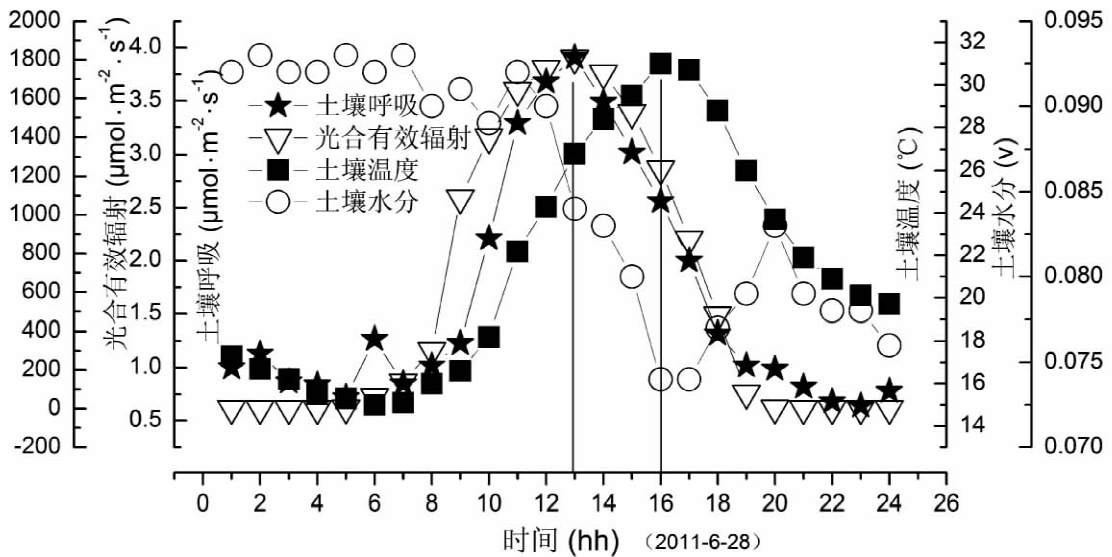


图 1 土壤呼吸与土壤温度、水分、光合有效辐射日变化

Fig.1 Daily variations of soil respiration, soil temperature, soil moisture and photosynthetically active radiation

### 2.2 冬小麦农田土壤呼吸和影响因子月变化规律

用每月测定一天的数据初略的代表一月的数值,首先选择那个统计量代表日观测值总体的大小,需要分析数据的分布特征。利用正态 W 检验方法( shapiro. test() ) 分析了土壤呼吸、光合有效辐射、土壤温度和土壤水分日变化量分布特征,得出土壤呼吸等测定值指标大部分分布不符合正态分布或者指数正态分布,因此选择中位数代表各项指标日变化值。计算连续 2 年每月所测 1 天的土壤呼吸以及影响因子的中位数和标准差(图 2)。由图 2 得出:土壤呼吸与土壤温度和光合有效辐射具有一定的相关性,与土壤水分相关性较弱。综合考虑晴天和阴天,土壤呼吸月份变化规律表现为:从 4 月份开始逐渐升高,到达一定数值后开始降低。由于土壤呼吸与土壤温度的相关性,由图 2 得出土壤温度在 7 月份达到最大值,再加上研究区域 7 月份温度最高,所以初步得出土壤呼吸速率最大值也可能出现在 7 月,由于所测时间仅为 2 年每月的一天的数据,受温度等气象因子的影响,在一定程度上不能准确代表月份的变化趋势,但是也从侧面说明土壤呼吸和其主要影响因子间的变化趋势。

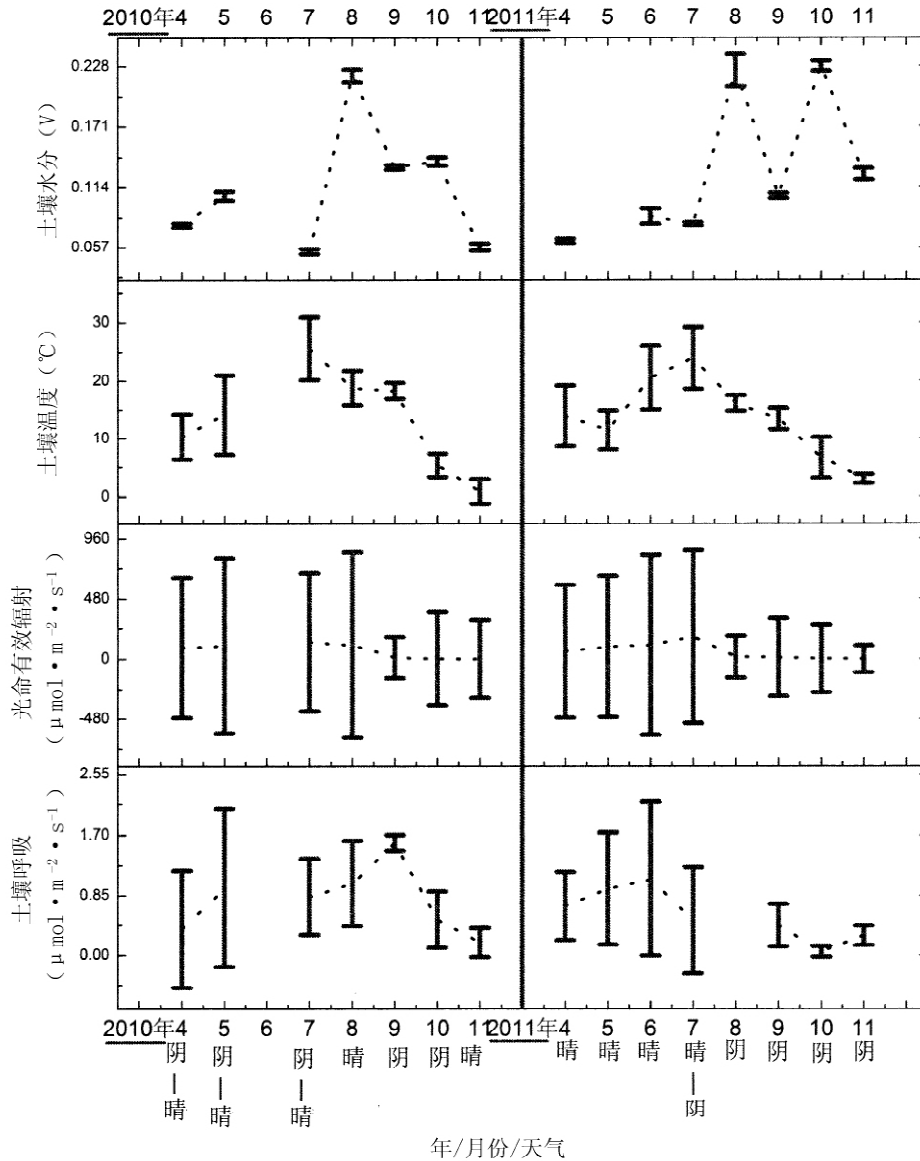


图 2 土壤呼吸与土壤温度、水分、光合有效辐射月变化

Fig. 2 Monthly variations of soil respiration, soil temperature, soil moisture and photosynthetically active radiation

### 2.3 冬小麦农田土壤呼吸和影响因素相关分析

#### 2.3.1 冬小麦农田土壤呼吸和影响因素日观测值间的相关分析

Pearson 相关系数是经常使用的相关系数并且具有一定的前提条件,首先利用正态 W 检验方法( shapiro. test() ) 检验得出各项指标日观测值间并不总是呈现正态分布,并且不符合二元正态分布,所以不能

采用 Pearson 相关系数,采用非参数相关分析法,应用 Spearman 秩相关系数描述变量间的相关程度(表 1)。由表 1 得出:土壤呼吸总体与光合有效辐射、土壤温度呈现显著相关关系( $p < 0.01$ ),土壤温度季节变异较小或较低的情况下,土壤呼吸与土壤温度 Spearman 秩相关系数也较小;土壤呼吸与土壤水分在不同测定时间 Spearman 秩相关系数不同,土壤水分对土壤呼吸影响具有不确定性。

表 1 土壤呼吸等观测因子间相关分析(每天测定值)

Tab.1 The correlation analysis between soil respiration and its impact factors (daily data)

项目	土壤呼吸								
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
2010	光合有效辐射	0.886**	0.863**		0.85**	0.520**	0.593**	0.701**	0.764**
	土壤温度	0.680**	0.682**		0.731**	0.683**	0.368	0.402	0.472*
	土壤水分	-0.648**	0.449*		-0.722**	-0.547**	0.657**	0.269	0.062
2011	光合有效辐射	0.804**	0.902**	0.889**	0.913**		0.812**	-0.244	0.542**
	土壤温度	0.841**	0.854**	0.537**	0.639**		0.644**	0.223	0.481*
	土壤水分	-0.682**		-0.052	0.085		0.390	0.154	0.304

注: \*\* :  $p < 0.01$ , \* :  $p < 0.05$ 。

### 2.3.2 冬小麦农田土壤呼吸和影响因素月份观测值间的相关分析

统计每月某一天所测 24 小时各项指标的中位数,计算 Spearman 秩相关系数(表 2),由表 2 得出:土壤呼吸与土壤温度具有显著的相关关系( $p = 0.006 < 0.01$ ),土壤呼吸与土壤水分和光合有效辐射无显著相关关系,由于土壤呼吸与土壤温度间的显著相关关系,由于参数检验比非参数检验功效高,所以对土壤呼吸与土壤温度的月观测值进行正态检验,检验得出:土壤呼吸观测值分布符合正态分布( $W = 0.96, p = 0.68 > 0.05$ ),土壤温度观测值分布符合正态分布( $W = 0.96, p = 0.80 > 0.05$ ),土壤呼吸和土壤温度观测值符合二元正态分布( $mshapiro.test()$ ), $W = 0.92, p = 0.22 > 0.05$ ),所以针对土壤呼吸和土壤温度的关系选择检验功效和结果明确的 Pearson 相关系数,统计分析得出 Pearson 相关系数为 0.643,土壤呼吸与土壤温度具有显著相关关系( $t = 2.79, df = 11, p = 0.018$ ,95%置信区间(0.143~0.882)),土壤温度能够解释土壤呼吸总变异的 41.3%,在月份变化中土壤水分、土壤温度和光合有效辐射 3 项指标中土壤温度对土壤呼吸的影响最显著。

表 2 土壤呼吸等观测因子间相关分析(中位数)

Tab.2 The correlation analysis between soil respiration and its impact factors (median value)

指标	土壤呼吸	光合有效辐射	土壤温度	土壤水分
土壤呼吸	1			
光合有效辐射	0.529	1		
土壤温度	0.714**	0.925**	1	
土壤水分	0.052	-0.323	-0.204	1

注: \*\* :  $p < 0.01$ 。

### 2.4 冬小麦农田碳释放的初步估算

在季节变化序列上,土壤呼吸与土壤温度具有显著的相关关系,相对于土壤水分,土壤温度对土壤呼吸具有更重要的影响,为了能够初步估算出宁夏黄土丘陵区冬小麦农田每年的碳释放量,需要进行土壤呼吸与土壤温度的回归分析,达到应用研究区域温度的变化初步估算碳释放量。对土壤呼吸与土壤温度进行方程拟合(表 3),拟合的 3 种方程均通过回归方程检验( $p < 0.05$ ),方程回归系数只有指数方程全通过检验( $p < 0.05$ )。同时  $Q_{10}$ 为温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,土壤呼吸增加的倍数,作为土壤呼吸对温度反应的敏感性指标,变率越小越稳定,指数方程计算得出的  $Q_{10}$ 变率最小,为 2.14,因此选择指数方程进行土壤呼吸进行预测。采用累积算法,在没有连续土壤温度数据的基础上初步选择空气温度的值对区域冬麦地土壤呼吸进行初步的估算,按照低于  $0.8^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸值取  $0.18\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其它值由方程得出,统计得出冬麦地的碳释放量  $168\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 3 土壤呼吸与土壤温度拟合方程

Tab.3 Fitted equation of soil respiration and soil temperature

方程	$R^2$	p	温度范围( $^{\circ}\text{C}$ )	$Q_{10}$
$Y = e^{(-1.731 + 0.076x)}$	0.432	0.01	0.8~25.5	2.1~2.2
$Y = -0.047 + 0.08x - 0.002x^2$	0.482	0.04	0.8~25.5	1.5~2.6
$Y = 0.18 + 0.035x$	0.414	0.02	0.8~25.5	1.0~5.5

### 3 讨论

高天明等(2011)<sup>[8]</sup>利用ACE研究得出土壤呼吸日动态均呈单峰曲线,最高值出现在中午12:00-14:00,夜间土壤呼吸最低(凌晨1:00-3:00)与文中研究相似;马骏等(2011)<sup>[9]</sup>研究得出不同深度的土壤温度与土壤呼吸速率显著相关,土壤含水量变化较小,土壤含水量与土壤呼吸速率间的相关性不显著;李玉强等(2006)<sup>[10]</sup>研究得出温度和水分对土壤呼吸的影响存在显著性作用,温度影响强于水分;李熙波等(2011)<sup>[11]</sup>研究得出地上生物量、地下生物量、总生物量以及土壤温度均与土壤呼吸极显著相关( $P < 0.01$ );文中研究得出土壤呼吸日观测值与土壤温度日观测值具有显著的相关关系,与土壤水分日观测值具有不确定的相关关系,土壤呼吸月观测值与土壤温度月观测值具有显著的相关关系,与土壤水分月观测值和光合有效辐射月观测值不具有显著相关性。土壤水分对土壤呼吸的影响存在较多的一致,也证实了土壤温度与土壤水分对土壤呼吸的交互影响以及复杂性,文中研究仪器水分探头的测定精度( $\pm 3\%$ )以及水分变化区间较小都影响了土壤水分与土壤呼吸相关关系的分析。

光合有效辐射是生物量形成的重要能源,是重要的气候资源,影响着地表与大气环境物质、能量的交换,文中研究在没有去除光合有效辐射夜间为零时段土壤呼吸值,日观测值间的相关分析得出土壤呼吸与光合有效辐射的相关性高于土壤温度,图1也揭示了土壤呼吸与光合有效辐射具有共同变化的趋势,并且共变趋势强于土壤呼吸与土壤温度的变化趋势,光合有效辐射与温度具有显著的相关性,说明除土壤温度外近地表空气温度可能对土壤呼吸具有更好的相关性。在月观测值中光合有效辐射与土壤呼吸不具有显著相关关系,可能与观测时段阴天较多具有重要关系,还需进一步分析。也进一步揭示了在较大尺度上温度是影响土壤呼吸的重要因子。土壤呼吸是陆地碳循环的主要组成部分,是土壤中植物根系、微生物、动物等生物代谢作用的结果,影响生物的活动因子都将影响土壤呼吸作用的强弱。文中研究只对土壤呼吸变化特征以及其环境影响因子光合有效辐射、土壤表层温度、土壤表层水分进行了初步探讨,关于土壤呼吸影响因子的复杂性尤其是温度和水分等因子的共同作用需要进一步的分析。

### 4 结论

土壤呼吸日连续观测值分析表明:正常气候状况下,冬麦地土壤呼吸、光合有效辐射、土壤温度呈现"单峰型"的变化规律,土壤呼吸最大值出现在13:00左右,与光合有效辐射最大值出现的时间较为一致,比土壤温度最大值出现的时间提前;土壤呼吸与土壤温度、光合有效辐射总体具有显著的相关( $P < 0.01$ ),土壤呼吸与光合有效辐射的关系比土壤温度更密切,考虑到夜间光合有效辐射为0等因素,不能较好的表征土壤呼吸,因此温度是影响和表征土壤呼吸的重要因子;土壤呼吸与土壤水分(0-10cm)关系具有不确定性。

土壤呼吸月观测值分析表明:在季节变化中土壤呼吸主要受温度的影响,与温度具有显著的相关关系,与土壤水分和光合有效辐射不具有显著的相关关系。土壤呼吸速率季节变化规律与温度相似,总体呈现先升高后降低的变化趋势。相关分析表明土壤温度只能解释土壤呼吸总变异的41.3%,指数方程能够较好的拟合土壤呼吸与土壤温度的关系,利用指数方程初步估算出研究区域冬小麦农田的碳释放量为 $168\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 参考文献

- [1] Aich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(B): 81-99.
- [2] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2919-2924.
- [3] 代快, 蔡典雄, 王燕, 等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究-土壤温度对土壤呼吸速率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 64-69.
- [4] 付刚, 周宇庭, 沈振西, 等. 不同海拔高寒放牧草甸的生态系统呼吸与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2789-2794.
- [5] 王义祥, 吴志丹, 翁伯琦, 等. 翻耕和生草对果园土壤碳排放的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(增1): 20-22.
- [6] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 等. 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[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 190-196.
- [7] 王建林, 赵风华, 欧阳竹. 灌溉量对灌浆期麦田土壤呼吸的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 186-189.
- [8] 高天明, 张瑞强, 梁占岐. 希拉穆仁围封草原土壤呼吸通量研究[J]. 草业科学, 2011, 28(1): 33-38.
- [9] 马骏, 唐海萍. 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化[J]. 植物生态学报, 2011, 35(2): 167-

175.

[10]李玉强,赵哈林,赵学勇等. 土壤温度和水分对不同类型沙丘土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境 2006 20(3): 154-158.

[11]李熙波,杨玉盛,曾宏达等. 亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸[J]. 生态学报 2011 31(8): 2096-2105.

## Characteristics of soil respiration of winter wheat farmland and the affecting factors in the Loess hilly region of Ningxia

DONG Liguó , XU Hao , ZHANG Yuanrun , CAI Jinjun , PAN zhanbing , MA Fan

( Institute of Desertification Control ,Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science , Yinchuan 750002 , P. R. China)

**Abstract:** Soil respiration is a key link of terrestrial carbon cycle , and an important source of atmospheric CO<sub>2</sub>. Taking winter wheat farmland as research object in this study , characteristics of soil respiration , soil moisture and photosynthetically active radiation , their relationships and carbon emissions were researched by ACE ( Automated CO Exchange Station) in Loess hilly region of southern Ningxia. The results suggested as follow: ( 1) Soil respiration showed " single peak pattern" , maximum value appeared at about 13:00 and a minimum value at night. ( 2) Diurnal variation of soil respiration showed that soil respiration and soil temperature ( 0 - 10cm) and photosynthetic active radiation had a significant positive correlation (  $P < 0.01$  ) , the relation with the soil moisture was uncertain. ( 3) Seasonal changes in soil respiration showed that soil respiration and soil temperature had significant correlation (  $P < 0.01$  ) , and the soil moisture content and photosynthetic active radiation had no significant correlation. ( 4) Winter wheat farmland carbon emissions was  $168\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .

**Key words:** Loess hilly region of Ningxia; winter wheat farmland; soil respiration; soil temperature; soil moisture; photosynthetically active radiation