

# 秸秆覆盖对旱作冬小麦农田土壤呼吸、作物产量及经济–环境效益的影响\*

涂 纯<sup>1</sup> 王 俊<sup>1\*\*</sup> 官 情<sup>1</sup> 刘文兆<sup>2</sup>

(1. 西北大学城市与环境学院 西安 710127; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100)

**摘 要** 基于 2009—2011 年田间试验,研究了黄土旱塬区不同秸秆覆盖措施下冬小麦农田土壤呼吸和小麦产量变化,计算了生产每千克籽粒产量下土壤 CO<sub>2</sub> 的释放量,并以此比较了处理间的经济–环境效益值。试验包括 4 个处理:无覆盖对照(CK)、全年 9 000 kg·hm<sup>-2</sup> 秸秆覆盖(M<sub>9000</sub>)、全年 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> 秸秆覆盖(M<sub>4500</sub>)和夏闲期秸秆覆盖(SF)。结果表明:冬小麦生育期内土壤 CO<sub>2</sub> 累积释放量在处理间无显著差异,但第 1 年生育期为 14.92~17.43 t(CO<sub>2</sub>)·hm<sup>-2</sup>,显著高于第 2 年[12.95~13.69 t(CO<sub>2</sub>)·hm<sup>-2</sup>]( $P < 0.05$ ),处理和年份的交互作用不显著。与 CK(产量 5.03 t·hm<sup>-2</sup>)相比,秸秆覆盖降低了作物产量,其中 M<sub>9000</sub>(4.71 t·hm<sup>-2</sup>)与 CK 差异显著。经济–环境效益值计算结果显示,冬小麦生育期内生产每千克籽粒释放 2.96~3.16 kg CO<sub>2</sub>,处理间无显著差异。从各处理平均值看,小麦产量以及经济–环境效益值均存在显著的年际差异,降水偏少的第 1 年度作物产量(4.60~4.98 t·hm<sup>-2</sup>)显著低于降水相对丰富的第 2 年度(4.50~5.47 t·hm<sup>-2</sup>),但经济–环境效益值(3.03~3.69 kg·kg<sup>-1</sup>、2.45~2.88 kg·kg<sup>-1</sup>)结果相反。处理和年份对作物产量和经济–环境效益值具有显著的交互影响,在缺水年份秸秆覆盖能够提高作物产量,M<sub>9000</sub> 处理具有最优的经济–环境效益;而在丰水年份,秸秆覆盖导致产量显著下降,CK 具有更好的经济–环境效益。

**关键词** 旱作冬小麦 秸秆覆盖 土壤呼吸 产量 经济–环境效益

**中图分类号:** S344.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2013)08-0931-07

## Effect of straw mulching on soil respiration, crop yield, economy-environment benefit in rainfed winter wheat fields

TU Chun<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, GUAN Qing<sup>1</sup>, LIU Wen-Zhao<sup>2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract** As a common cultivation pattern in the Loess Plateau, straw mulching has played a significant role in increasing grain yield, improving water use efficiency and regulating soil CO<sub>2</sub> emission. A field experiment was conducted to measure the response of soil respiration and crop yield to different straw mulching treatments under winter wheat monoculture system in 2009—2011. Economy-environment benefit, calculated by soil CO<sub>2</sub> emission per unit wheat yield, was also evaluated for each mulching treatment. The four treatments included the control (CK) without mulching, 9 000 kg·hm<sup>-2</sup> (M<sub>9000</sub>) and 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> (M<sub>4500</sub>) of straw mulching year-round, and 9 000 kg·hm<sup>-2</sup> (SF) straw mulching during summer fallow. The results showed similar variations in soil respiration rates among treatments during crop growth period. No significant differences were noted among mulching treatments in both years in terms of cumulative soil CO<sub>2</sub> emissions during growing season. However, average range of soil CO<sub>2</sub> emission for treatments in the first year [14.92~17.43 t(CO<sub>2</sub>)·hm<sup>-2</sup>] was significantly higher than that in the second year [12.95~13.69 t(CO<sub>2</sub>)·hm<sup>-2</sup>]. In terms of emitted soil CO<sub>2</sub>, the interactions among treatments and year were insignificant. Compared with CK, straw mulching decreased crop yield remarkably. The difference between M<sub>9000</sub> and CK was significant at  $P < 0.05$ . Economy-environment benefit index suggested that for 1 kg grain produced, the soil released 2.96~3.16 kg CO<sub>2</sub>. Straw

\* 国家自然科学基金项目(31270484, 41171033)和教育部科技重点项目(209123)资助

\*\*通讯作者: 王俊(1974—), 男, 教授, 主要从事农田生态学研究。E-mail: wangj@nwu.edu.cn

涂纯(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事农田土壤碳排放研究。E-mail: tuchunabc@sina.com

收稿日期: 2012-09-11 接受日期: 2013-04-02

mulching did not influence average economy-environment benefit. Grain yield and economy-environment benefit varied for the two years. Grain yield in the first year, during which rainfall was less than average, was significantly lower than that in the rainy second year. On the contrary, economy-environment benefit index of the first year ( $3.03\sim 3.69\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) was markedly higher than that of the second year ( $2.45\sim 2.88\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Treatments and years had significant interaction effects on grain yield and economy-environment benefit. While straw mulching had the potential to increase grain yield in dry year,  $M_{9000}$  treatment had the best economy-environment benefit value. For rainy years, straw mulching treatments decreased crop yield, while the economy-environment benefit index under CK was fairly good.

**Key words** Rain-fed winter wheat, Straw mulching, Soil respiration, Yield, Economy-environment benefit

(Received Sep. 11, 2012; accepted Apr. 2, 2013)

大气  $\text{CO}_2$  浓度增加导致的温室效应已成为人们重点关注的环境问题之一, 每年大气中增加的  $\text{CO}_2$  约为 0.5%, 严重影响到全球环境及区域气候变化<sup>[1]</sup>。而农田生态系统作为陆地碳库及全球碳循环的重要组成部分, 强烈地受到人类活动的影响, 耕作方式、施肥、灌溉等农田管理活动都会改变土壤碳排放强度<sup>[2-3]</sup>。据统计, 通过农业活动排放的  $\text{CO}_2$  占人为温室气体排放量的 21%~25%, 已被认同为大气  $\text{CO}_2$  的重要源<sup>[2]</sup>, 因此减少农田碳排放具有重要的环境价值。我国人口众多, 耕地面积不足, 粮食安全问题一直受到重视, 在倡导碳减排及低碳型农业背景下, 通过何种管理手段来实现农田生态系统高产出、低排放目的, 值得学者研究。有学者提出经济-环境效益概念<sup>[4]</sup>(即农田中收获每千克作物产量时, 从土壤中释放的碳量)来评价不同管理措施下农田具有的增产、减排综合效益。其中孟磊等<sup>[4]</sup>在半干旱半湿润地区研究显示, 不同施肥方式下农田每收获 1 kg 籽粒产量, 以  $\text{CO}_2$  形式释放的碳为 0.29~1.92 kg; 而崔凤娟<sup>[5]</sup>在内蒙古农牧交错带地区进行的留茬覆盖处理研究认为, 生产每千克籽粒产量, 农田土壤释放 2.16~3.27 kg  $\text{CO}_2$ 。虽然上述研究具有差异性, 但其主要目的是通过量化土壤碳排放与作物产量的关系, 探讨不同管理措施对农田综合效益的影响。

秸秆覆盖是我国旱作农田区常见的栽培措施。研究表明<sup>[6-9]</sup>, 秸秆覆盖具有的蓄水增肥作用, 能显著增加作物产量。然而秸秆覆盖后土壤理化性质发生显著变化, 对农田土壤  $\text{CO}_2$  释放过程同样具有强烈影响。官情等<sup>[10]</sup>、王同朝等<sup>[11]</sup>研究表明, 旱地农田进行秸秆覆盖后, 土壤呼吸速率虽然与无覆盖处理具有相似的季节变化规律, 但其呼吸速率显著大于无覆盖处理; 同时, 覆盖后土壤温度、水分与土壤呼吸速率也具有极显著的线性或非线性关系。目前有关旱地农田秸秆覆盖的研究着重于作物产量或土壤  $\text{CO}_2$  释放及其控制机理方面, 较少涉及产量和碳排放关系的量化研究。基于此, 本研究通过田间定位试验, 探讨不同秸秆覆盖方式对冬小麦农田土壤呼吸和小麦产量的影响, 并在此基础上评价不同秸

秆覆盖方式的经济-环境效益, 旨在为该地覆盖条件下农田的增产与减排研究提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省长武县十里铺村( $35^{\circ}12.787'\text{ N}$ ,  $107^{\circ}44.703'\text{ E}$ , 海拔 1 220 m), 该地为黄土高原典型的半湿润半干旱性季风气候, 年平均降水量 581 mm, 其中 50%的降水量集中在 7—9 月份冬小麦休闲期, 多年平均降水达到 303 mm<sup>[12]</sup>。年平均气温  $9.4^{\circ}\text{C}$ , 大于  $10^{\circ}\text{C}$  积温为  $3\,029^{\circ}\text{C}$ , 土壤为黏壤质黑垆土, 母质为中壤质马兰黄土, 土层深厚、土质疏松<sup>[13]</sup>。

### 1.2 试验设计

覆盖种植试验开始于 2008 年, 冬小麦种植期间设计无覆盖处理(CK)、全年  $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  秸秆覆盖处理( $M_{9000}$ )、全年  $4\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  秸秆覆盖处理( $M_{4500}$ )、夏闲期秸秆覆盖处理(SF, 覆盖量  $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 每处理 3 次重复, 随机区组排列, 每小区面积  $66.7\text{ m}^2$ 。每年 9 月下旬进行小麦播种, 次年 6 月下旬收获休闲。播种前采用圆盘耙机耕松土蓄墒, 并在每个处理小区施基肥尿素  $135\text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷肥  $90\text{ kg(P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中覆盖处理施用各小区收获后晒干的秸秆,  $M_{4500}$  和  $M_{9000}$  处理在播种后将秸秆剪切至 5~10 cm 进行覆盖, 并持续至次年翻耕前清除; SF 处理只在休闲期覆盖剪切后的秸秆。

### 1.3 土壤呼吸、气象因子、小麦产量测定

土壤呼吸测定采用 Li-8100 (LI-COR, Lincoln, NE, USA)开路式土壤碳通量测量系统, 于 2009 年 9 月至 2010 年 6 月、2010 年 9 月至 2011 年 6 月测定; 其中小麦越冬期(每年 11 月至次年 2 月)每月测定 1 次, 其余生育期每隔 10~20 d 测定 1 次。每次测定在 9:00—12:00 完成, 尽量选择在无风晴天进行。土壤呼吸测定前 24 h, 在每个小区内安置内径为 20 cm 的圆环基座, 并齐地去除基座内一切活体, 以避免安置基座和基座内动植物呼吸对土壤扰动造成的短期呼吸速率波动<sup>[14-15]</sup>。

生育期内测定的气温和降水数据(图1), 由试验

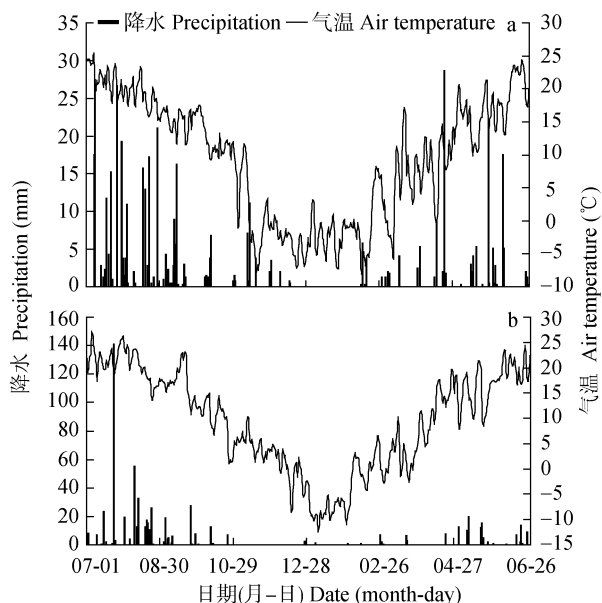


图1 2009—2010年度(a)和2010—2011年度(b)研究区气温和降水的变化

Fig. 1 Variation of air temperature and precipitation in 2009—2010 (a), 2010—2011 (b) in the study area

地自动气象观测系统记录获取。

每年6月收获时,小麦脱粒后晒干,称重测量干重籽粒产量。

#### 1.4 土壤呼吸累积释放量、经济-环境效益值计算

土壤呼吸累积释放总量运用目前常用的测量均值相加计算得出<sup>[16-17]</sup>,计算公式如下;

$$R_a = (R_i + R_{i+n}) / 2 \times 3600 \times 24 \times 44 \times 10^{-8} n \quad (1)$$

式中,  $R_a$  为关键生育期土壤呼吸累积释放量 [ $t(\text{CO}_2) \cdot \text{hm}^{-2}$ ],  $R_i$  为第  $i$  次测量的土壤呼吸速率,  $R_{i+n}$  为间隔  $n$  天测量的土壤呼吸速率,  $n$  为相邻两次测量间隔天数。

由于农田的经济效益主要由作物产量表征,而旱作农田土壤碳释放的形式主要为  $\text{CO}_2$ <sup>[18-19]</sup>,其环境效益主要是影响大气  $\text{CO}_2$  浓度。因此通过参照之前的研究<sup>[4-5]</sup>,本研究在计算经济-环境效益值时,直接采用土壤呼吸累积释放总量与小麦产量比值得出,计算公式如下:

$$E_b = R_a / Y \quad (2)$$

式中:  $E_b$  为经济-环境效益值 ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 表示生产每千克籽粒产量时,农田土壤释放的  $\text{CO}_2$  量;  $R_a$  为关键生育期土壤呼吸累积释放量 [ $t(\text{CO}_2) \cdot \text{hm}^{-2}$ ];  $Y$  为小麦籽粒产量 ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

#### 1.5 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2003软件处理数据和制图,运用SPSS 16.0软件进行统计分析。由于处理间土壤呼吸速率、土壤呼吸累积释放总量、小麦产量以及经济-环境效益值是两年测量值,因此利用重复测量方差分析法分析不同生育期的测量差异,其中处

理间差异用最小显著差异法(LSD)分析,显著性差异水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆覆盖处理土壤呼吸的变化

图2显示,冬小麦生育期内各秸秆覆盖处理土壤呼吸速率的季节变化基本一致。播种至出苗期(9月至10月),土壤呼吸速率较高;之后随气温下降,小麦进入越冬期(11月至翌年2月),呼吸速率降低并持续至返青期(3月份);返青以后气温升高,小麦快速生长,呼吸速率增大,并出现明显波动。从测定值来看,9月份由于翻耕、播种等人为扰动影响,使得冬小麦出苗期各处理间土壤  $\text{CO}_2$  释放水平较高,总体在  $1.87 \sim 2.00 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,各处理间无显著差异 ( $P>0.05$ )。进入越冬期,气温降低,土壤微生物和小麦根系活动减缓,导致土壤呼吸速率降至生育期最低值,并持续至返青期,此阶段CK、 $M_{9000}$ 、 $M_{4500}$ 、SF处理土壤呼吸速率 [ $\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ] 分别为0.82、0.60、0.66、0.80,其中  $M_{9000}$ 、 $M_{4500}$  处理分别显著低于CK处理26.83%和19.51% ( $P<0.05$ ),表明秸秆覆盖降低越冬期麦田土壤呼吸速率。返青后随着气温升高,小麦植株生长迅速,同时土壤微

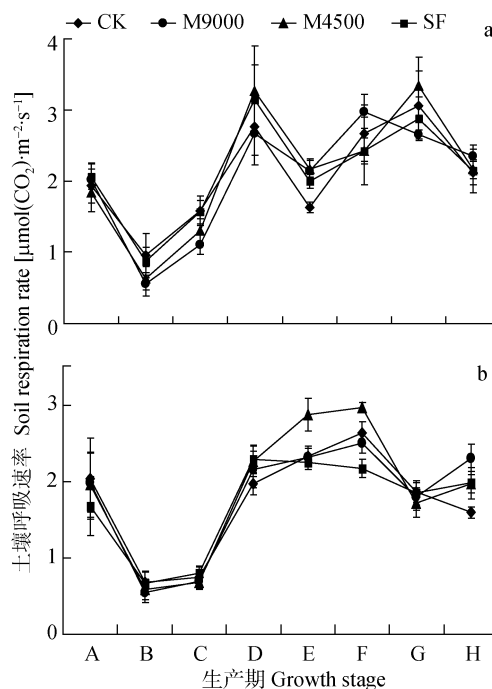


图2 2009—2010年度(a)和2010—2011年度(b)小麦生育期不同秸秆覆盖处理土壤呼吸的变化

Fig. 2 Variation of soil respiration under different straw mulching treatments during growth period of winter wheat in 2009—2010 (a) and 2010—2011 (b)

A: 出苗期 seedling stage; B: 越冬期 overwintering stage; C: 返青期 regreening stage; D: 拔节期 jointing stage; E: 孕穗期 booting stage; F: 抽穗期 heading stage; G: 灌浆期 filling stage; H: 成熟期 maturation stage.

生物也变得活跃,从拔节期至收获期,CK、M<sub>9000</sub>、M<sub>4500</sub>、SF处理呼吸速率[ $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]分别为2.21、2.33、2.44、2.33,其中M<sub>4500</sub>处理显著大于CK处理10.41% ( $P<0.05$ ),其余处理相对CK无显著性差异,表明少量秸秆覆盖在此阶段明显提高土壤CO<sub>2</sub>释放。

不同秸秆覆盖处理冬小麦全生育期土壤CO<sub>2</sub>释放总量计算表明(表1),单个生长季节所有处理土壤CO<sub>2</sub>释放总量在13.93~15.31 t(CO<sub>2</sub>)·hm<sup>-2</sup>,处理间无显著差异( $P>0.05$ ),且处理与年份不具有显著的交互作用。但不同生长季差异达到极显著水平( $P<0.01$ ),2009—2010年生长季释放量为14.92~17.43 t(CO<sub>2</sub>)·hm<sup>-2</sup>,

与2010—2011年12.95~13.69 t(CO<sub>2</sub>)·hm<sup>-2</sup>相比,高15.21%~32.15%,表明土壤CO<sub>2</sub>累积释放量在不同生长季发生明显变化,原因可能是水热条件的改变影响到土壤理化性质以及土壤呼吸的生物学过程。通过土壤呼吸与气温、降水的二元逐步回归分析(表2),显示2009—2010年生长季所有处理的决定系数为54.4%~64.8%,2010—2011年为65.9%~87.7%,其中在前一生长季大部分处理(M<sub>9000</sub>处理除外)气温和降水对土壤呼吸释放有显著影响,而在第2年生长季,降水对土壤呼吸的影响作用总体减弱(M<sub>9000</sub>处理除外),此时气温主导呼吸速率,说明水热条件变化对土壤CO<sub>2</sub>释放产生显著影响。

表 1 不同秸秆覆盖处理土壤呼吸总量、籽粒产量和经济-环境效益值

Table 1 Cumulative soil respiration, crop yield and economy-environment benefit values of different straw mulching treatments

处理 Treatment	土壤呼吸总量 Cumulative soil respiration [t(CO <sub>2</sub> )·hm <sup>-2</sup> ]			籽粒产量 Crop yield (t·hm <sup>-2</sup> )				经济-环境效益值 Economy-environment benefit (kg·kg <sup>-1</sup> )			
	2009—2010	2010—2011	均值 Mean	2010	2011	均值 Mean		2009—2010	2010—2011	均值 Mean	
CK	16.92ab	13.40a	15.16a	4.60b	5.47a	5.03a		3.69a	2.45b	3.07a	
M <sub>9000</sub>	14.92b	12.95a	13.93a	4.93a	4.50d	4.71b		3.03b	2.88a	2.96a	
M <sub>4500</sub>	16.12ab	13.69a	14.89a	4.98a	5.02b	5.00a		3.24ab	2.73a	2.99a	
SF	17.43a	13.19a	15.31a	4.91a	4.78c	4.84ab		3.55ab	2.76a	3.16a	
<i>P</i>											
处理 Treatment											
年份 Year											
处理×年份 Treatment×year											

同列不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different letters in a same column mean significant difference among treatments at 5% level.

表 2 小麦生育期不同秸秆覆盖处理土壤呼吸(*R*)与气温(*T*)、降水(*W*)的逐步回归方程

Table 2 Stepwise regression equation between soil respiration (*R*) and air temperature (*T*), precipitation (*W*) under different straw mulching treatments during different winter wheat growth periods

年份 Year	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>	<i>n</i>
2009—2010	CK	$R=0.781+0.066T+0.027W$	0.642	0.004	14
	M <sub>9000</sub>	$R=0.749+0.094T$	0.544	0.003	14
	M <sub>4500</sub>	$R=0.558+0.057T+0.051W$	0.648	0.003	14
	SF	$R=0.757+0.066T+0.033W$	0.608	0.006	14
2009—2011	CK	$R=0.825+0.073T$	0.659	0.001	13
	M <sub>9000</sub>	$R=0.592+0.075T+0.015W$	0.877	0.000	13
	M <sub>4500</sub>	$R=0.591+0.075T+0.020W$	0.828	0.000	13
	SF	$R=0.795+0.073T$	0.813	0.000	13

## 2.2 不同秸秆覆盖处理的小麦产量变化

从表 1 小麦产量分析可以看出,CK、M<sub>9000</sub>、M<sub>4500</sub>、SF 处理两年小麦产量均值分别为 5.03 t·hm<sup>-2</sup>、4.71 t·hm<sup>-2</sup>、5.00 t·hm<sup>-2</sup>、4.84 t·hm<sup>-2</sup>,总体上覆盖处理比对照减少了小麦产量。但重复测量方差分析表明,处理和年份之间有极显著的交互作用( $P<0.01$ ),其中 2010 年所有处理小麦产量为 4.60~4.98 t·hm<sup>-2</sup>,秸秆处理 M<sub>9000</sub>、M<sub>4500</sub>、SF 相比无覆盖处理 CK 分别显著增加 7.07%、8.15%、6.70%( $P<0.05$ );2011 年

籽粒产量在 4.50~5.47 t·hm<sup>-2</sup>,但秸秆处理 M<sub>9000</sub>、M<sub>4500</sub>、SF 分别比 CK 显著减少 17.79%、8.28%、12.58%( $P<0.05$ );单个处理分析认为,2011 年 M<sub>9000</sub>处理小麦产量相比 2010 年减产 8.73%,CK 处理则增产 18.87%,两种处理的年际差异都达到显著性水平( $P<0.05$ )。小麦产量出现这种明显的年际变化,可能与休闲期降水形成的底墒量有关<sup>[20]</sup>。通过图 1 分析,2009 年 7—9 月份休闲期试验区降水量为 271 mm,低于该地休闲期均值 303 mm,而且全年降水总量为

454 mm, 为降水缺少年份; 而 2010 年休闲期降水达 475 mm, 全年降水量 642 mm, 为丰水年份。因此, 该地进行秸秆覆盖可能只在降水较多的年份增加冬小麦产量, 在丰水年可能会出现减产, 尤其是进行多量秸秆覆盖, 其导致的减产效果可能更显著。

### 2.3 不同秸秆覆盖处理的经济-环境效益值

基于不同处理的土壤呼吸总量和小麦产量分析, 将两者比值, 计算了每千克籽粒收获时土壤释放的  $\text{CO}_2$  量<sup>[4-5]</sup>, 并比较了不同处理小麦农田的经济-环境效益(表 1)。计算结果显示, 单个生长季 CK、 $\text{M}_{9000}$ 、 $\text{M}_{4500}$ 、SF 处理生产每千克籽粒, 各处理农田土壤将分别释放 3.07 kg、2.96 kg、2.99 kg、3.16 kg 的  $\text{CO}_2$ , 处理间差异不显著; 但方差分析表明, 各处理的经济-环境效益在不同生长季比较达到极显著水平( $P < 0.01$ ), 而且年份和处理具有显著的交互影响( $P < 0.05$ )。在第 1 个生长季缺水条件下, 所有处理的经济-环境效益值为 3.03~3.69  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其中 CK 处理的经济-环境效益值(3.69  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著高于  $\text{M}_{9000}$  处理(3.03  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 第 2 个生长季降水相对增加, 各处理综合效益值减小至 2.45~2.88  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 此时 CK 和  $\text{M}_{9000}$  处理值的比较结果与第 1 个生长季相反, 这表明黄土高原地区的降水变化对农田  $\text{CO}_2$  释放和小麦产量产生重要影响, 这将导致不同管理措施下农田经济-环境效益产生显著差异。

## 3 讨论与结论

### 3.1 秸秆覆盖对土壤 $\text{CO}_2$ 释放的影响

万运帆等<sup>[21]</sup>、王同朝等<sup>[11]</sup>认为, 秸秆表覆可增加土壤呼吸强度, 因为秸秆覆盖可减轻雨滴直接击打地面, 消除土壤板结现象, 并改善土壤透气性、有机碳含量以及微生物活性组成, 从而促进  $\text{CO}_2$  释放。本研究显示冬小麦生育期内各处理土壤呼吸总量无显著差异, 其中夏闲期秸秆覆盖比无覆盖有增加土壤呼吸的趋势, 而全年秸秆覆盖却出现相反情况, 与上述研究不同。

秸秆覆盖下土壤水热状况、理化性质及有机质含量发生改变。对于 SF 处理, 夏季高温高湿条件下覆盖大量秸秆, 使得秸秆降解产生的有机物质颗粒下渗到土壤中, 增加了土壤有机碳含量<sup>[22]</sup>, 进而加速了微生物对其分解矿化过程, 导致释放更多的  $\text{CO}_2$ 。但全年 9 000  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 4 500  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的秸秆覆盖降低了土壤  $\text{CO}_2$  释放量, 可能是播种后立即覆盖阻碍了小麦正常出苗, 使得单位面积植株较少<sup>[7-8]</sup>, 与之相关的根际呼吸降低, 影响到  $\text{CO}_2$  释放; 另一方面, 返青后气温升高, 秸秆表覆造成土壤中的热量与外围空气交换受阻<sup>[10]</sup>, 使其土壤温度低于无覆

盖处理, 同时覆盖的保墒作用增大了土壤含水量, 低温高湿的土壤环境将降低土壤通透性, 减少土壤中  $\text{O}_2$  供应, 并抑制植物根系和好氧微生物活动<sup>[23]</sup>, 从而影响土壤呼吸。通过对比两年生长季发现, 2009—2010 年生长季土壤呼吸总量显著大于 2010—2011 年生长季, 而建立的土壤呼吸与水热因子的逐步回归方程, 决定系数具有显著的年际差异, 表明除水热条件外, 其余因素也强烈影响到  $\text{CO}_2$  释放。研究发现 2010 年所有处理小麦生物量均值为 14.19  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 大于 2011 年 12.82  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 较高的生物量表明小麦根系活跃, 导致呼吸增大; 另一方面, 2009 年降水少于 2010 年, 水分缺少将增加土壤孔隙度, 利于根系和微生物呼吸产生的  $\text{CO}_2$  释放出去, 而之后降雨又将刺激上述两种生物学过程<sup>[23]</sup>, 导致释放增加。

### 3.2 秸秆覆盖对小麦产量的影响

大多研究认为秸秆覆盖有较好的蓄水作用, 而且增加土壤有机碳含量和土壤肥力, 利于提高农作物产量<sup>[22,24-25]</sup>, 黄淮海地区<sup>[26]</sup>和黄土高原地区<sup>[27]</sup>的研究都显示秸秆覆盖下小麦产量显著提高。但覆盖形成的低温效应和阻碍作用可能导致作物出苗率下降, 并影响到产量<sup>[7,24,28]</sup>。同时, 在不同降水年型, 覆盖的增产作用也会产生变化。刘婷等<sup>[29]</sup>认为, 丰水年覆盖具有的保墒作用并不明显, 反而会延缓小麦生育期, 并在灌浆后期因高温胁迫使得灌浆中止而逼熟, 降低籽粒重量。党廷辉等<sup>[20]</sup>认为, 旱作农田区冬小麦产量受休闲期降水影响显著, 降水增加使得底墒增大, 利于小麦来年增产。本研究中两年小麦产量波动较大。2010 年秸秆覆盖相对无覆盖处理显著增产, 而 2011 年相反; 同时无覆盖处理在第 2 年度增产, 而 9 000  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  秸秆覆盖则出现显著减产。两年基本苗数据显示, 覆盖处理基本苗小于对照处理, 但处理间无显著差异, 说明两年内秸秆覆盖对小麦出苗影响不大。而 2009 年休闲期降水低于该地多年均值, 为缺水年份, 2010 年为丰水年, 这使得无覆盖处理的底墒在 2010 年远大于 2009 年, 从而在第 1 年生长季相对增产。而对于秸秆覆盖处理, 由于前一年度的缺水状况, 秸秆覆盖具有较好的蓄水保湿作用, 因此覆盖增产; 但在丰水年份, 覆盖处理的保水作用并不明显, 反而会导致低温效应影响到小麦籽粒发育, 最终影响产量。因此秸秆覆盖只有降水较少的情况下, 保墒作用才能明显提高小麦产量<sup>[26,29]</sup>, 降水充足的年份, 秸秆覆盖的保湿效应降低, 小麦可能出现减产。

### 3.3 秸秆覆盖对经济-环境效益的影响

秸秆覆盖作为节水型保护性耕作措施, 形成的

蓄水、保墒、增肥作用导致土壤理化性质差异,作物产量和  $\text{CO}_2$  释放也会明显不同。本研究得出不同秸秆覆盖下的小麦经济-环境效益值为  $2.96\sim 3.16 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与孟磊等<sup>[4]</sup>( $0.29\sim 1.92 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、崔凤娟<sup>[5]</sup>( $2.16\sim 3.27 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的研究不同。由于地区间气候的空间异质性以及研究方法的差异,导致小麦生长和土壤呼吸出现地域分异,并影响到农田生态系统的综合效益。

本研究显示不同秸秆覆盖处理在两年度的经济-环境效益值波动较大,尤其是 CK 处理和  $M_{9000}$  处理,具有显著年际差异。前一生长季各处理具有的水热条件,利于土壤  $\text{CO}_2$  释放;但对小麦生长而言,降水相对较少,CK 处理虽小麦产量相对降低, $\text{CO}_2$  释放较高,因此 CK 处理经济-环境效益值较高。第 2 年度的降水和气温条件,虽然不利于土壤呼吸,但降水增加提高了 CK 处理小麦产量,因此经济-环境效益较低; $M_{9000}$  处理形成的相对高湿和低温状况,虽降低了土壤  $\text{CO}_2$  释放量,也造成小麦返青后随温度升高而贪青徒长,并影响到产量,导致其综合效益值显著高于 CK 处理。因此降水较少的年份,秸秆覆盖具有较好的综合效益;而在降水充足时,无秸秆覆盖较为理想。本研究为短期观测结果,由于降水和气温的年际差异,导致雨养型农田区在秸秆覆盖条件下水热条件、土壤肥力和有机质含量也会产生明显变化,这将进一步影响到作物产量和土壤  $\text{CO}_2$  释放,因此今后需要进行长期的观测研究,才能更好地探明该地最佳的农田覆盖管理措施。

致谢:感谢中国科学院长武黄土高原农业生态试验站高长青实验员在野外试验中给予的具体帮助。

## 参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 2-3
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627
- [3] James W R, Aydin T. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71-90
- [4] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-692  
Meng L, Ding W X, Cai Z C, et al. Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(6): 687-692
- [5] 崔凤娟. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤呼吸和碳平衡的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011  
Cui F J. Effects of zero tillage and mulching on soil respiration and carbon balance in rainfed field[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011
- [6] 赵聚宝, 梅旭荣, 薛军红, 等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(2): 59-66  
Zhao J B, Mei X R, Xue J H, et al. The effect of straw mulch on crop water use efficiency in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1996, 29(2): 59-66
- [7] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19  
Gao Y J, Li S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 15-19
- [8] 汪丙国, 靳孟贵, 方连玉, 等. 衡水试验场冬小麦田土壤水流动系统分析[J]. 水土保持研究, 2001, 8(1): 89-92  
Wang B G, Jin M G, Fang L Y, et al. Analysis of soil water flow system of the winter-wheat cropland in Hengshui Experimental Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2001, 8(1): 89-92
- [9] 陈素英, 张喜英, 刘孟雨. 玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 34-37  
Chen S Y, Zhang X Y, Liu M Y. Soil temperature and soil water dynamics in wheat field mulched with maize straw[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2002, 23(4): 34-37
- [10] 官情, 王俊, 宋淑亚, 等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1471-1476  
Guan Q, Wang J, Song S Y, et al. Effects of different mulching measures on winter wheat field soil respiration in Loess Plateau dry land region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1471-1476
- [11] 王同朝, 卫丽, 田原, 等. 冬小麦-夏玉米一体化垄作覆盖下农田土壤呼吸变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1970-1974  
Wang T C, Wei L, Tian Y, et al. Dynamic changes of soil respiration on mulched bed planting under winter wheat and summer maize double cropping integration[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(9): 1970-1974
- [12] Wang J, Liu W Z, Dang T H. Responses of soil water balance and precipitation storage efficiency to increased fertilizer application in winter wheat[J]. Plant Soil, 2011, 347(1/2): 41-51
- [13] 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素[J]. 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5217-5224
- [14] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1911-1922  
Zhang L H, Chen Y N, Li W H, et al. Soil respiration in desert ecosystems of the arid region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1911-1922
- [15] Rex A O, Tony J V, Doug R, et al. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations[J]. Soil & Tillage Research,

- 2007, 95(1/2): 182–195
- [16] 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. 冬小麦旺盛生长期  $\text{CO}_2$  浓度升高对土壤呼吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1111–1116
- Kou T J, Zhu J G, Xie Z B, et al. Effect of elevated atmospheric  $\text{pCO}_2$  on soil respiration during wheat bloom-growth period[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 1111–1116
- [17] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3174–3180
- Zhang F, Guo S L, Zou J L, et al. Effects of nitrogen fertilization, soil moisture and soil temperature on soil respiration during summer fallow season[J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3174–3180
- [18] 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2184–2192
- Chen S T, Hu Z H, Zhang Y, et al. Review of the factors influencing the temporal and spatial variability of soil respiration in terrestrial ecosystem[J]. Environmental Science, 2011, 32(8): 2184–2192
- [19] 李虎, 邱建军, 王立刚, 等. 中国农田主要温室气体排放特征与控制技术[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 159–165
- Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. The characterization of greenhouse gases fluxes from croplands of China and mitigation technologies[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 159–165
- [20] 党廷辉, 高长青. 渭北旱塬影响小麦产量的关键降水因子分析[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 9–11, 36
- Dang T H, Gao C Q. Study on key water factors of affecting wheat yield in Weibei Dry Highland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 9–11, 36
- [21] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 田间管理对华北平原冬小麦产量土壤碳及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2495–2500
- Wan Y F, Li Y E, Gao Q Z, et al. Field managements affect yield, soil carbon, and greenhouse gases emission of winter wheat in North China Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2495–2500
- [22] 卜玉山, 邵海林, 王建程, 等. 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 322–326
- Bu Y S, Shao H L, Wang J C, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 322–326
- [23] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 972–978
- Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972–978
- [24] 李荣, 张睿, 贾志宽. 不同覆盖材料对耕层土壤温度及玉米出苗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 13–16
- Li R, Zhang R, Jia Z K. Effects of different covering materials on tillth soil temperature and maize emergence[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 13–16
- [25] Reicosky D C, Reeves D W, Prior S A, et al. Effects of residue management and controlled traffic on carbon dioxide and water loss[J]. Soil & Tillage Research, 1999, 52(3/4): 153–165
- [26] 张萍, 李其昀, 于磊, 等. 秸秆覆盖对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2008, 22(5): 48–51
- Zhang P, Li Q Y, Yu L, et al. The influence of the mulching straw on growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 22(5): 48–51
- [27] 张树兰, Lovdahl L, 同延安. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 20–24
- Zhang S L, Lovdahl L, Tong Y A. Effects of different field management practices on winter wheat yield and water utilization efficiency in Weibei Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(4): 20–24
- [28] 张金霞, 刘成元, 施炯林, 等. 河西灌区免耕秸秆覆盖对春小麦播种及出苗的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(4): 31–37
- Zhang J X, Liu C Y, Shi J L, et al. Effects of no tillage with stubble mulch on sowing and seedling of spring wheat in the Hexi Irrigation Area[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2006, 41(4): 31–37
- [29] 刘婷, 贾志宽, 张睿, 等. 秸秆覆盖对旱地冬小麦灌浆动态及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 34–37
- Liu T, Jia Z K, Zhang R, et al. Effect of straw mulching on grain filling dynamics of winter wheat and yield in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 34–37