

# 黄土高原半干旱丘陵区农田土壤呼吸通量分析

陈计玲, 王乐, 李欣, 张峰, 李凤民

(兰州大学生命科学学院草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 农田土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 农业管理措施会对土壤呼吸产生直接的影响。黄土高原作为中国农田的重要组成部分, 本区域内广泛采用覆膜作为农业增产措施。为了探索覆膜对土壤碳循环的影响, 本研究以黄土高原半干旱丘陵区玉米农田为研究对象, 分析了不同覆膜管理方式及不同无机氮肥施加条件下, 土壤呼吸通量的日变化、玉米生育期内的通量变化以及通量与环境因子的关系。研究表明:  $\text{CO}_2$  通量日变化规律比较明显, 均为双峰排放模式。在整个玉米生长季中,  $\text{CO}_2$  平均通量为  $1043\sim 1138\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 覆膜处理在苗期显著增强土壤呼吸, 而施氮肥对于  $\text{CO}_2$  通量无显著性影响。 $\text{CO}_2$  通量受温度、水分及可溶性有机碳等因子的共同影响, 相关性分析表明, 以上因子与  $\text{CO}_2$  排放通量呈正相关。

**关键词:**  $\text{CO}_2$  通量; 日变化;  $\text{CO}_2$  浓度; 覆膜; 施肥

**中图分类号:** S-3

## Soil Respiration Analysis of Maize Field in Semiarid Area of Loess Plateau

Chen Jiling, Wang Le, Li Xin, Zhang Feng, Li Fengmin

(State Key Lab of Grassland Agro-Ecosystem, College of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract:** Soil respiration is a significant part of the terrestrial ecosystem carbon cycle. Agricultural management measures have a direct impact on soil respiration. As an important component of farmland in China, plastic film mulching was widely used to increase the crop production. This study choose maize field as the research object in semi-arid hilly area of The Loess Plateau to explore the influence of plastic mulching to soil carbon cycle. This paper analyzed diurnal variation of soil respiration,  $\text{CO}_2$  flux in corn growth stage and how the flux effected by the environment factors under different plastic mulching and fertilization conditon. The result shows that  $\text{CO}_2$  flux diurnal variation was a double-peak emission model. The mean value of  $\text{CO}_2$  flux is  $1043\sim 1138\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  during the whole growth stage. Plastic mulching significantly promoted the soil respiration at seedling stage; while nitrogen fertilization had no significant effect on soil repiration.  $\text{CO}_2$  flux is collectively affected by temperature, moisture and dissolved organic carbon. Correlation analysis shows that  $\text{CO}_2$  flux was positively related to all the above factors.

**Keywords:**  $\text{CO}_2$  flux; diurnal variation;  $\text{CO}_2$  concentration; plastic mulching; nitrogen fertilization

## 0 引言

近年来, 由于大气中的温室气体浓度升高导致的全球变化问题越来越受到民众和政府部门的关注, 而二氧化碳作为大气中最重要温室气体, 对地球系统的能量收支、气候形成有着重要的影响<sup>[1]</sup>。 $\text{CO}_2$ 是最重要的人为温室气体, 在 1970 年至 2004 年期间,  $\text{CO}_2$ 年排放量已经增加了大约 80%, 从 210 亿吨增加到 380 亿吨, 在 2004 年已占到人为温室气体排放总量的 77%, 2005 年大气中  $\text{CO}_2$  浓度 (379ppm) 远远超过了过去 650,000 年的自然变化的范围

基金项目: 国家自然科学基金(31200335)

作者简介: 陈计玲, (1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业生态学。

通信联系人: 李凤民, (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生态学各主流领域。E-mail: fmli@lzu.edu.cn

[2], 辐射效应占温室气体的 60% [3]。

全球碳循环在很大程度上是以二氧化碳的方式流动的。土壤是巨大的碳库, 是大气中二氧化碳的源和汇, 其巨大的碳储量使得即使是微小的变化也会牵动整个大气环境中二氧化碳浓度发生变化 [4], 因此土壤呼吸在调控区域及全球尺度的碳循环上起着十分关键的作用。

农业活动的温室气体排放和农田固碳能力已成为气候变化和可持续低碳农业发展中备受关注的热点问题。自 20 世纪 70 年代, 土壤 CO<sub>2</sub> 排放的研究已经开始被重视 [5,6]。土壤呼吸是一个复杂的生物学过程, 从细胞到全球的每一个级别中, 呼吸作用都包括多个化学、物理和生物过程, 而生物过程又被一系列生物和非生物因子所影响 [7]。它不仅受到温度、湿度、pH 值和风速等环境条件的影响, 而且还受到有关生物过程如植被、土壤动物以及人为因素, 如耕作、残渣管理、有机肥施用等活动的影响 [8,9,10,11]。

黄土高原位于中国西北部, 介于北纬 34-40°和东经 102-112°之间。包括青海、甘肃、山西、陕西、内蒙古等地, 总面积达到 62 万平方公里, 其中半干旱区占我国国土面积的 4.6% [12]。中国西北黄土高原半干旱区水资源极缺, 降雨的匮乏和较大的波动性给作物产量的稳定及提高带来了严峻的挑战 [13]。进入 90 年代, 化学肥料、覆膜和集水技术等新兴农业措施已被广泛应用于农业生产, 并且大幅度提高了作物的产量 [14,15]。近几年, 全膜双垄沟播培技术被认为是旱作农业技术史上的一次变革, 而广泛用于春玉米的种植 [16,17]。为解决西北地区的粮食安全问题提供了重要保障。

覆膜后地膜切断了土壤水分与近地层空气中水分的交换通道, 有效抑制了蒸发, 使总蒸发量大幅度下降, 保证了耕层土壤有较高的含水量 [18,19], 增加了耕地的土壤温度 [20], 同时土壤中的氧气含量也随之降低, 微生物活动模式发生变化, 改变了土壤碳氮循环发生的环境。对于裸地土壤呼吸过程的研究已经取得了较为成熟的结果, 产生了一系列模型, 但覆膜方式下土壤呼吸变化机理的研究仍处于起步阶段 [21,22], 需要进一步进行定量化研究并探索其机理过程。

本实验设计了六个不同处理, 测定其玉米生长期土壤呼吸速率, 并探究温度、水分、施肥量等因素对于土壤呼吸的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本概况

试验于 2012 年 4 月到 2012 年 10 月在黄土高原半干旱生态系统试验站进行。试验地点位于甘肃省榆中县中连川乡中连川村(36° 02' N, 104° 25' E, 海拔 2400 米)。该地区其后为中温带半干旱气候: 年平均气温 6.5℃, 气温最高月份(7 月)为 19.0℃, 最低月份(1 月)为 -8.0℃。年平均自由水蒸发量为 1300mm。年平均降雨量 320mm, 大约 56% 的降雨发生在 7-9 月份。试验田为滩地, 土壤为黑麻土(FAO taxonomy), 0-20cm 的土壤容重为 1.14 g/cm<sup>3</sup>, 有机质 7.6g/kg, 水解氮 26mg/kg, 有效磷 5mg/kg。田间持水量为 22.9%, 凋萎湿度为 6.2%。

### 1.2 实验设计

试验包括 6 个处理:

- 1) 齐垄覆膜施肥(M1N1): 齐垄方式全覆膜, 每公顷施用 300Kg 尿素。
- 2) 齐垄覆膜不施肥(M1N0): 齐垄方式全覆膜, 不施用尿素。
- 3) 齐垄不覆膜施肥(M0N1): 齐垄方式不覆膜, 每公顷施用 300Kg 尿素。
- 4) 齐垄不覆膜不施肥(M0N0): 齐垄方式不覆膜, 不施用尿素。

5) 双垄沟覆膜施肥(DRM): 双垄沟方式全覆膜, 每公顷施用 300Kg 尿素。

6) 裸地作为对照组(B)

六个处理各有三重复, 随机区组排列, 小区面积为 10m×10m。尿素作为基肥在起垄前均匀撒到地面, 齐垄方式垄宽为 55cm, 垄高为 20cm。双垄沟方式大垄垄宽 70cm, 小垄垄宽为 40cm, 大垄垄高为 10cm, 小垄垄高为 20cm。株距为 40cm, 4 月底播种, 9 月底收获。

### 1.3 测定目标和方法

#### 1.3.1 土壤呼吸测量

地上气体采用静态箱方法。地下气体采用导气管原位采集方法。气体样品使用注射器采集, 使用气象色谱仪测定样品中的 CO<sub>2</sub> 含量。每周采集一次, 采集时间为早上 9 点到 11 点。每次抽取气体时使用地温计测量地温, 土钻法取土测定土壤含水量。整个生长季共做 3 次气体日变化, 早 6 点到次日 6 点, 间隔 3 小时采集一次地上地下气体并分析 CO<sub>2</sub> 含量。

#### 1.3.2 土壤可溶性碳

播种前到收获后, 每月采集一次, 用土钻法分层采集样品将鲜土过 10 目筛子, 氯化钙溶液提取, TOC 仪测定土壤可溶性碳。

#### 1.3.3 数据统计分析

实验数据进行正态分布的检测后, 用 SAS 统计分析软件中的 ANOVA 进行方差分析。用 origin8 进行作图。各个图表中的数据为平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验期间降雨量

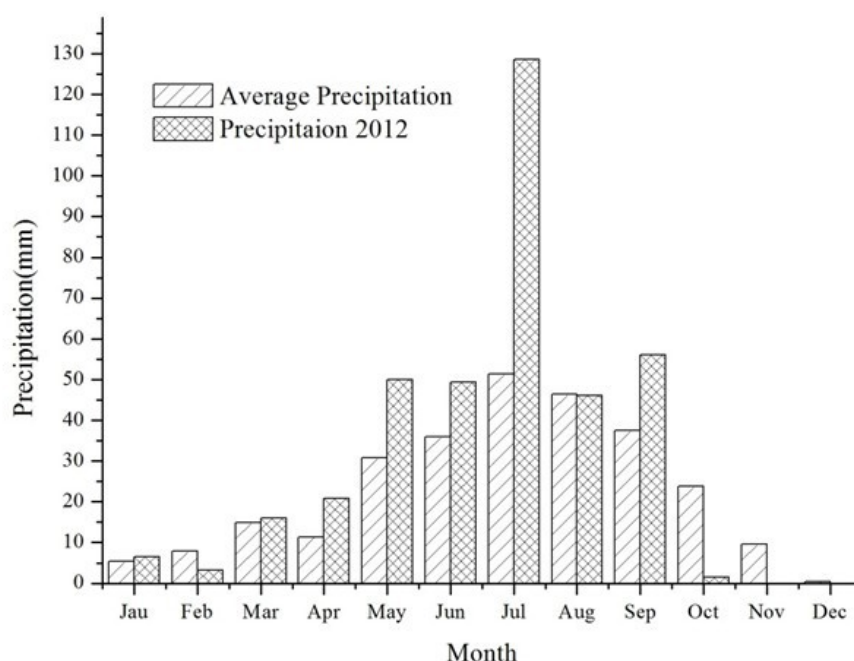


图1 2012 年及过去十年平均月降水量

Fig. 1 Monthly Precipitation during the Test Period

2012 年试验地降水量为 378mm。与过去十年的平均年降水量(275mm)相比, 2012 年降水比较丰富。玉米生育期在 4 月下旬至 9 月末, 而由图 1 可以看出, 2012 年整个玉米生长季的降水量都比十年平均降水量有不同程度的增加, 尤其是 7 月份, 降水量达到 128.6mm。

## 2.2 CO<sub>2</sub> 通量的日变化

本实验在整个玉米生长期內工作了三次日变化。其中第一次和第三次均为晴朗天气, 而 7-23 日为阴天并伴有小雨。图 2-a 可以看出, 各处理在上午 9 点以后地温缓慢上升, 在 15 点时地温达到最高值, 覆膜的三个处理(DRM、M1N1、M1N0)的地温明显高于不覆膜的三个处理(M0N1、M0N0、B), 而且随时间变化, 覆膜与不覆膜处理的地温差逐渐加大。

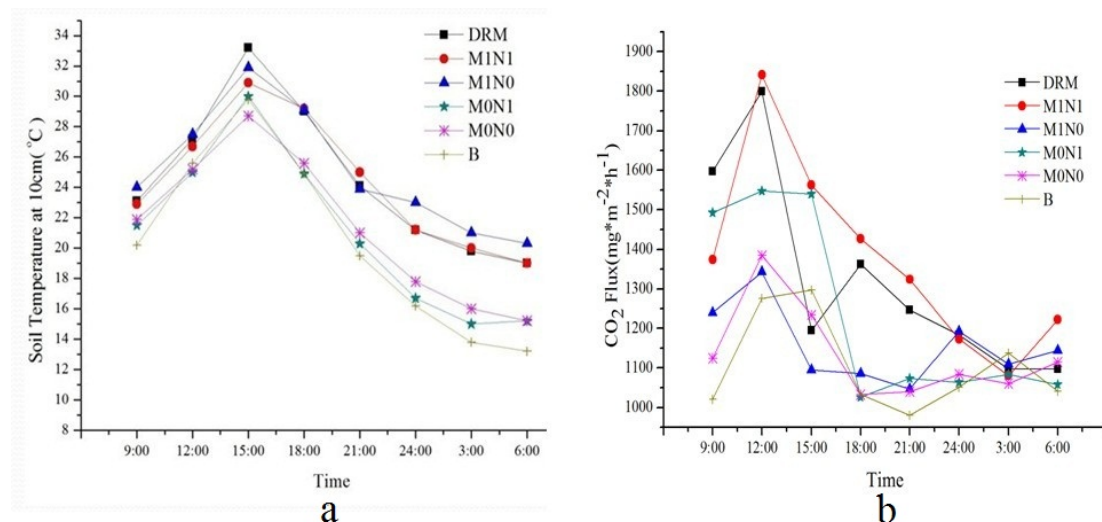


图 2 6-15 日各处理 10cm 地温及 CO<sub>2</sub> 通量变化

(a 代表 10cm 地温日变化; b 代表 CO<sub>2</sub> 通量日变化)

Fig. 2 Diurnal Variation of Soil Temperature at 10cm Depth and CO<sub>2</sub> Flux on June 15<sup>th</sup>

(a presents Diurnal Variation of Soil Temperature at 10cm Depth; b presents Diurnal Variation of CO<sub>2</sub> Flux)

由图 2-b 看出, 各处理 CO<sub>2</sub> 通量呈双峰排放模式, 且第二个排放峰要小于第一个排放峰。早晨 9 点以后 CO<sub>2</sub> 通量随着土壤温度的升高而增加, 随着土壤温度的持续升高, 在中午 12 点左右达到第一个峰值, 然后下午随温度的降低而下降。第二个排放峰出现在 18 点至 3 点之间。覆膜处理 M1N1 的 CO<sub>2</sub> 排放量高于不覆膜处理 M0N1, 施肥对 CO<sub>2</sub> 通量的影响不明显。

7-23 日各处理地温的日变化(图 3-a)趋势与第一次日变化的相同, 不同的是各处理地温到达最高值的时间不同, M0N0、M0N1、B 三个处理在中午 12 点达到最高, 而 DRM、M1N1、M1N0 三个处理在 15 点达到最高, 这可能是由于该日为阴天的缘故。



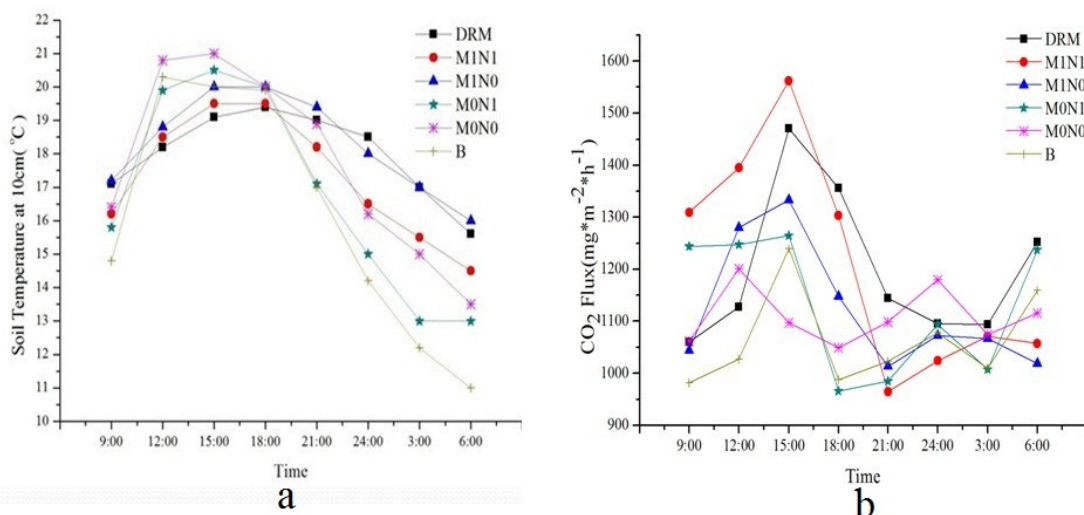
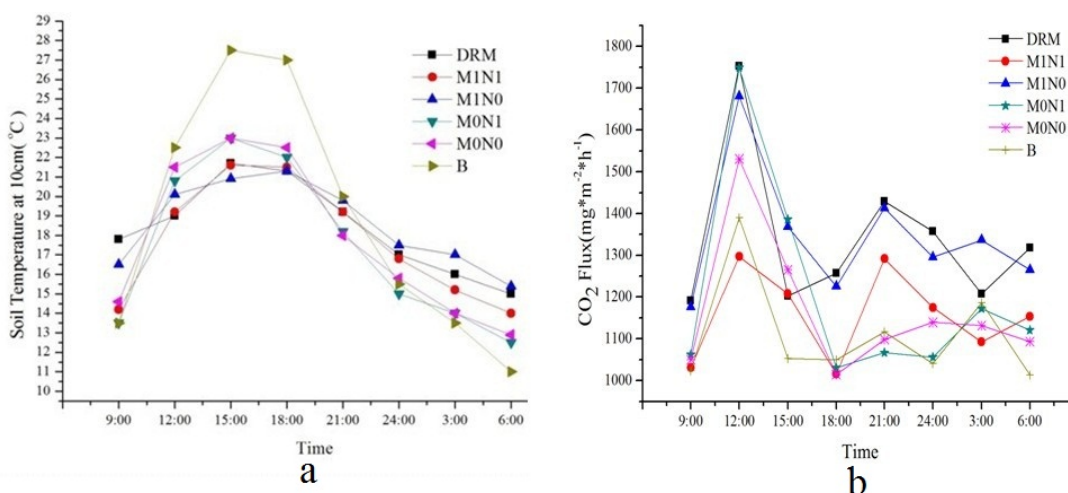
图3 7-23日各处理10cm地温及CO<sub>2</sub>排放量日变化(a 代表10cm地温日变化; b代表CO<sub>2</sub>通量日变化)Fig. 3 Diurnal Variation of Soil Temperature at 10cm Depth and CO<sub>2</sub> Flux on July 23th(a presents Diurnal Variation of Soil Temperature at 10cm Depth; b presents Diurnal Variation of CO<sub>2</sub> Flux)

图3-b可得, 7-23日各处理CO<sub>2</sub>排量日变化仍为双峰排放模式, 五个处理均在15点达到最高点。第二个排放峰在夜间24点至凌晨3点之间。其中 DRM、M0N1、B三个处理的第二个排放峰比较高, 均在凌晨6点。其他三个处理 M1N1、M1N0、M0N0三个处理的第二个排放峰远小于第一个排放峰。覆膜和施肥对通量变化无明显影响。

图4-a中的地温日变化与第一次日变化趋势相似, 早9:00开始, 随着时间的推移, 地温逐渐升高, 至15:00左右达到最大值。与第一次日变化所不同的是, 自15:00左右达到最高值之后, 覆膜处理和不覆膜处理之间的温差随时间的变化趋势已不明显。这是由于在8月底, 玉米植株的盖度已经基本上达到最大, 另外随着生育期的推进, 地膜的老化和破损程度逐步增加, 导致保温效果变差。

图4 8-28日各处理10cm地温及CO<sub>2</sub>排放量日变化(a 代表10cm地温日变化; b代表CO<sub>2</sub>通量日变化)Fig. 4 Diurnal Variation of Soil Temperature at 10cm Depth and CO<sub>2</sub> Flux on August 28th(a presents Diurnal Variation of Soil Temperature at 10cm Depth; b presents Diurnal Variation of CO<sub>2</sub> Flux)

8-28日的CO<sub>2</sub>通量规律(图4-b): 各处理都是第一次日变化相同的双峰排放模式, 且第一次峰值时间都为12点, 第二次峰值的时间在21点至凌晨3点之间, 且第二个峰值都低于

第一个峰值。图中没有观察到覆膜和施肥对  $\text{CO}_2$  通量日变化的影响。

### 2.3 玉米生育期内土壤 $\text{CO}_2$ 排放通量

由图 5，各处理  $\text{CO}_2$  排放通量均在 7 月中旬至 8 月下旬(玉米的拔节期和灌浆期)最为活跃，最高值在  $1283\text{--}1586 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  之间。在 9-21 日收获后，各处理的  $\text{CO}_2$  排量均为下降趋势，且以裸地 B 的下降趋势最为明显。在 6-25 日及 7-7 日的结果中，三个覆膜处理的  $\text{CO}_2$  通量显著高于三个不覆膜处理，而其他生育期未见显著性差异，结果表明，覆膜处理在玉米苗期提高了  $\text{CO}_2$  通量。

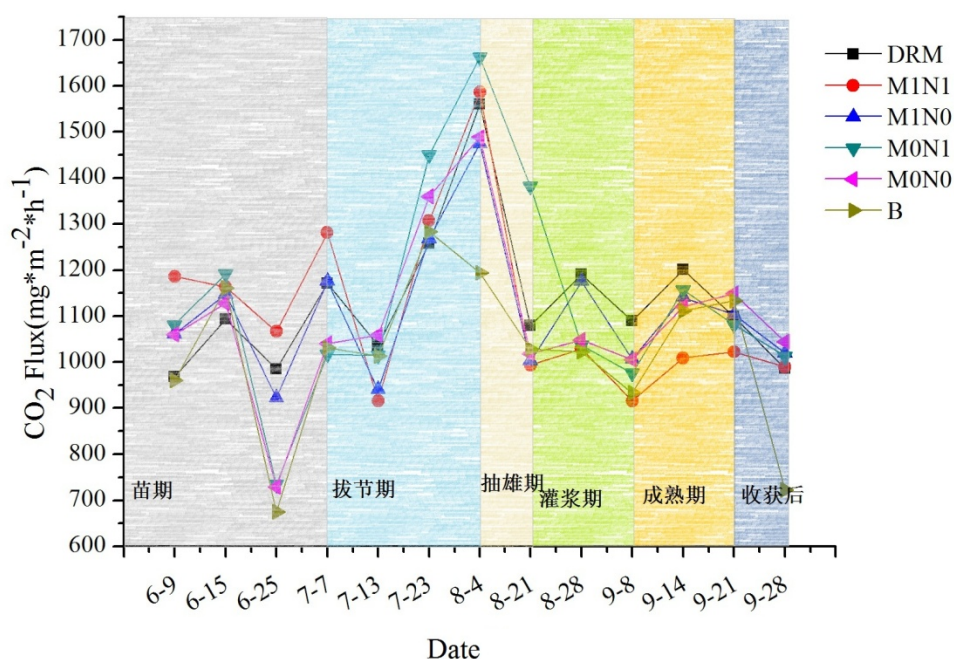


图 5 玉米各生育期  $\text{CO}_2$  排放通量  
Fig. 5  $\text{CO}_2$  Flux during Maize Growth Period

### 2.4 生育期内地下 $\text{CO}_2$ 浓度

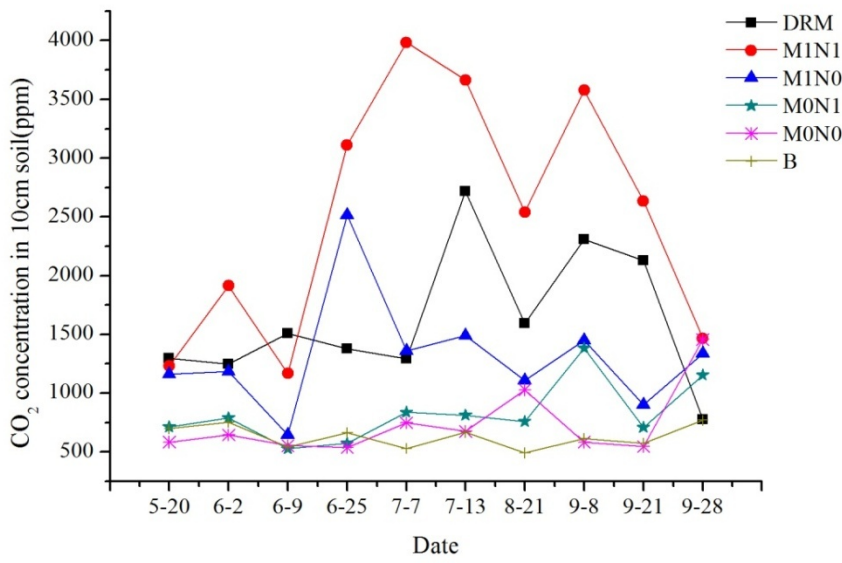
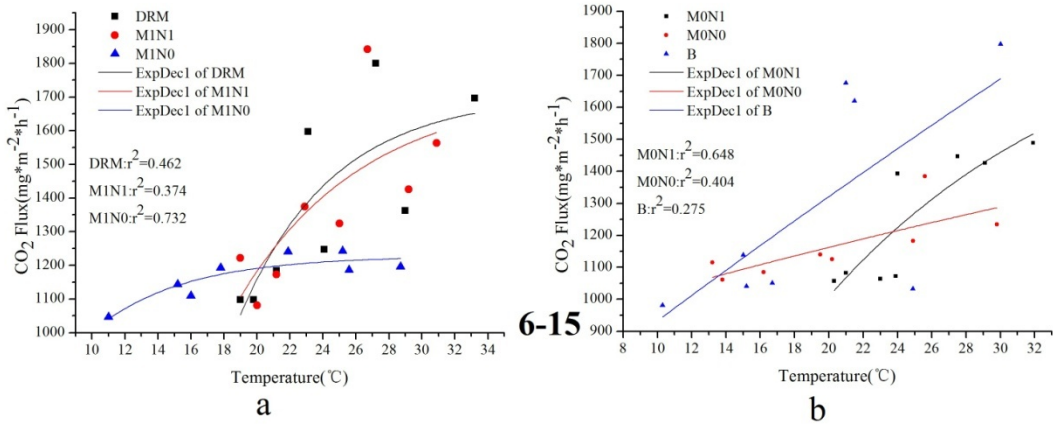
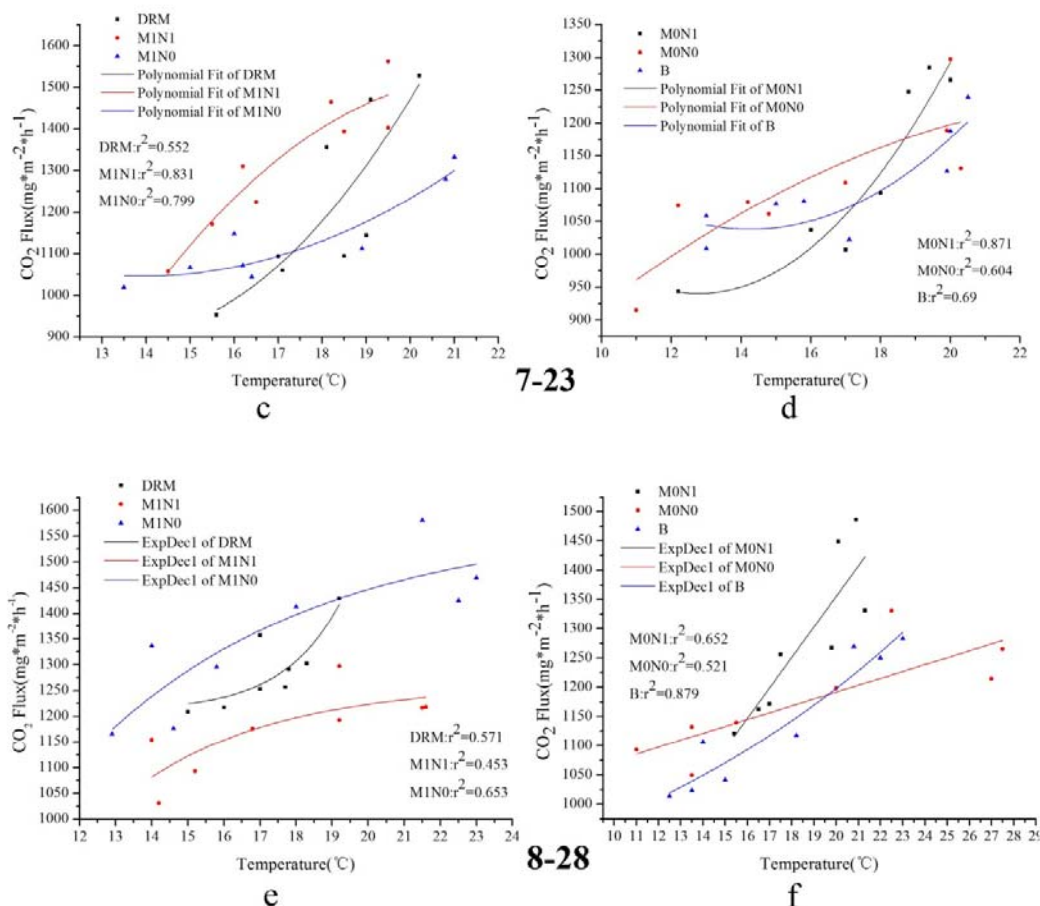


图 6 玉米生育期各处理地下 10cmCO<sub>2</sub> 浓度变化  
Fig. 6 CO<sub>2</sub> Concentration in 10cm Soil during Maize Growth Period

CO<sub>2</sub> 地下浓度平均值在 639.0—2325.5ppm 之间。图 6 中三个覆膜处理的 CO<sub>2</sub> 浓度在整个生育期内显著高于三个不覆膜处理，结果表明，覆膜处理可以显著提高地下 CO<sub>2</sub> 浓度；M1N1 处理的地下 CO<sub>2</sub> 浓度显著高于 M1N0 处理，结果表明在覆膜条件下，施肥处理可以显著提高地下 CO<sub>2</sub> 浓度。

2.5 温度与 CO<sub>2</sub> 通量相关性



图7 日变化温度与CO<sub>2</sub>排放通量的相关性

(a 代表 6-15 覆膜处理地温与 CO<sub>2</sub> 通量相关性; b 代表 6-15 不覆膜处理地温与 CO<sub>2</sub> 通量相关性; c 代表 7-23 覆膜处理地温与 CO<sub>2</sub> 通量相关性; d 代表 7-23 不覆膜处理地温与 CO<sub>2</sub> 通量相关性; e 代表 8-28 覆膜处理地温与 CO<sub>2</sub> 通量相关性; f 代表 8-28 不覆膜处理地温与 CO<sub>2</sub> 通量相关性)

Fig. 7 Correlation Analyses between Diurnal Variation of Soil Temperature and CO<sub>2</sub> Flux (a presents Correlation Analyses between Diurnal Variation of Soil Temperature and CO<sub>2</sub> Flux in plastic mulching treatments on June 15<sup>th</sup>; b presents Correlation Analyses between Diurnal Variation of Soil Temperature and CO<sub>2</sub> Flux in no plastic mulching treatments on June 15<sup>th</sup>; c presents Correlation Analyses between Diurnal Variation of Soil Temperature and CO<sub>2</sub> Flux in plastic mulching treatments on July 23<sup>th</sup>; d presents Correlation Analyses between Diurnal Variation of Soil Temperature and CO<sub>2</sub> Flux in no plastic mulching treatments on July 23<sup>th</sup>; e presents Correlation Analyses between Diurnal Variation of Soil Temperature and CO<sub>2</sub> Flux in plastic mulching treatments on August 28<sup>th</sup>; f presents Correlation Analyses between Diurnal Variation of Soil Temperature and CO<sub>2</sub> Flux in no plastic mulching treatments on August 28<sup>th</sup>)

由图 7 和表 1 看出, 在三次日变化观测过程中, 土壤温度与 CO<sub>2</sub> 通量呈显著正相关性 ( $p < 0.00001$ )。6-15 日和 8-28 日的日变化观测中, 地温与 CO<sub>2</sub> 通量为指数型相关, 而在 7-23 日的观测中, 地温与 CO<sub>2</sub> 通量为多项式型相关。其中 8-28 的处理 B 的地表地温与 CO<sub>2</sub> 相关性最高, 相关系数为 0.879, 在 7-23 日观测时, M0N1 处理的土壤温度与 CO<sub>2</sub> 排放量的相关性最高, 相关系数为 0.871。

表 1 三次日变化地温与 CO<sub>2</sub> 通量的相关系数  
Tab.1 Correlation Coefficient between Temperature in 10cm Soil and CO<sub>2</sub> Flux

Treatment	6-15	7-23	8-28
DRM	0.462 **	0.552 *	0.571 **
MIN1	0.374 **	0.831 *	0.453 **
MIN0	0.732 **	0.799 *	0.653 **
M0N1	0.648 **	0.871 *	0.652 **
M0N0	0.404 **	0.604 *	0.521 **
B	0.275 **	0.690 *	0.879 **

注: \*代表  $p < 0.05$ ; \*\*代表  $p < 0.0001$



## 2.6 水分与 CO<sub>2</sub> 通量相关性分析

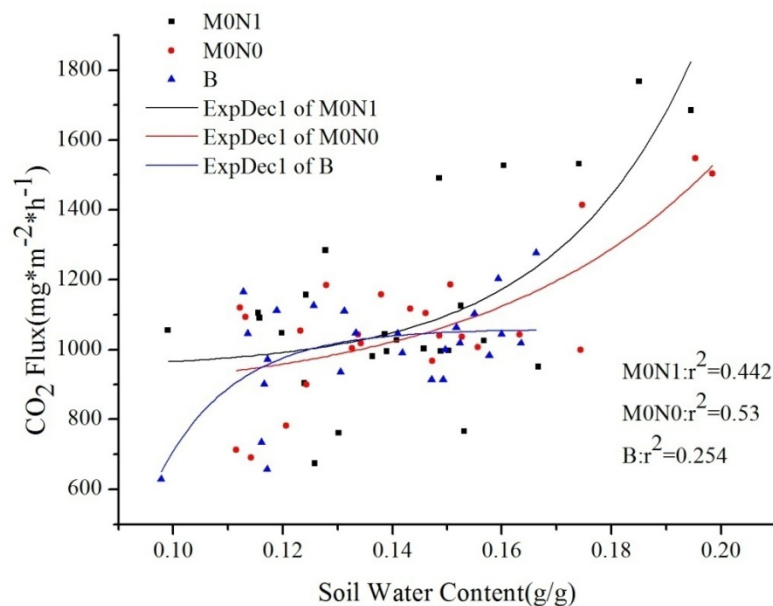


图 8 生育期内土壤水分含量与 CO<sub>2</sub> 通量相关性( $p<0.00001$ )

Fig. 8 Correlation Analyses between Soil Water Content and CO<sub>2</sub> Flux( $p<0.00001$ )

由图 8 看出, 三个不覆膜处理的表层土壤水分含量与 CO<sub>2</sub> 通量呈显著正相关。且拟合结果为指数增长型。其中 M0N1 处理和 M0N0 处理趋势大体相同, CO<sub>2</sub> 排放通量随土壤含水量的增加而增大。

## 2.7 土壤可溶性碳 DOC 与 CO<sub>2</sub> 通量相关性

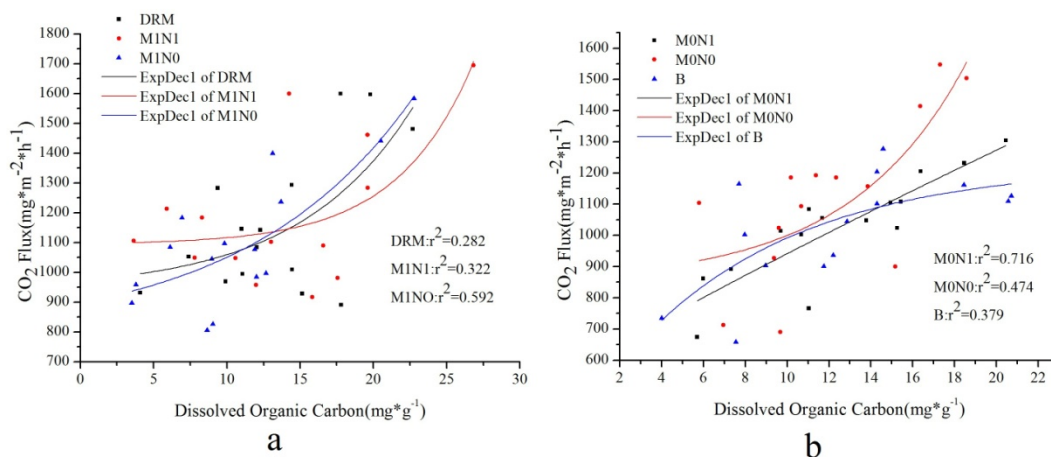


图 9 土壤可溶性碳 DOC 与 CO<sub>2</sub> 通量相关性( $p<0.00001$ )

(a 代表覆膜处理 DOC 与 CO<sub>2</sub> 通量相关性; b 代表不覆膜处理 DOC 与 CO<sub>2</sub> 通量相关性)

Fig. 9 Correlation Analyses between DOC and CO<sub>2</sub> Flux( $p<0.00001$ )

(a presents Correlation Analyses between DOC and CO<sub>2</sub> Flux in plastic mulching treatments; b presents Correlation Analyses between DOC and CO<sub>2</sub> Flux in no plastic mulching treatments)

由图 9 可知, 各处理的土壤可溶性碳与 CO<sub>2</sub> 通量有显著的正相关, 且都呈指数型相关。其中相关性最高的处理为 M0N1, 相关系数为 0.716, 处理 M1N01 和 M0N0 的相关性也较高, 相关系数分别为 0.592 和 0.474。

### 3 讨论

#### 3.1 CO<sub>2</sub> 通量日变化及生育期内变化情况

本实验所观测的三次日变化 CO<sub>2</sub> 通量均为双峰排放模式。在晴朗天气, 第一个峰值在 12 点左右到达, 而在小雨天气, 第一个峰值在 15 点左右到达。

Yiqi Luo 指出, 一天当中, 通常是早晨土壤 CO<sub>2</sub> 通量随着土壤温度的升高而增加, 在中午至下午时达到高峰, 然后整个下午和整个夜间都随温度的降低而下降<sup>[7]</sup>。而 Medina&Zelwer 在 1972 年提出, 在干旱生态系统中, 由于夜间相对湿度增加, 有利于土壤微生物的活动, 所以夜间的土壤呼吸速率甚至比白天的还要高<sup>[7]</sup>。因此本实验中观测到的双峰排放现象, 可能是由于凌晨时土壤湿度增加的原因。而由于本实验未测定土壤含水量的日变化情况, 因而此论点还需要进一步验证。

#### 3.2 温度对 CO<sub>2</sub> 通量的影响

温度几乎影响土壤呼吸过程的各个方面。在生物化学水平上, 呼吸系统包括许多酶以驱动糖酵解、三羧酸循环和电子传递链; 在土壤团聚体的水平上, 温度可以通过影响底物和氧气的运输而间接影响土壤呼吸; 在生态系统的水平上, 温度、与温度相应的光照及其他协同变动的因子影响着地下底物供应的季节性变化, 因而对土壤呼吸起着部分决定性作用<sup>[7]</sup>。

Rayment 在 2000 年曾指出, 在大多数情况下, 土壤呼吸的日变化都可用土壤温度的函数来解释。本次试验结果就得到了温度与 CO<sub>2</sub> 通量的拟合函数。三次日变化各处理的温度与 CO<sub>2</sub> 通量均呈显著正相关, 而相关性方程因天气情况的不同而产生差异。前人的研究也表明, 天气的变化会使生态系统获得的光强发生改变, 进而引起气温、湿度和大气压的变化, 而这些气候因子的多维改变能直接和交互的影响土壤呼吸作用(Gu et al ,1999)。

#### 3.3 覆膜处理对 CO<sub>2</sub> 通量及地下 CO<sub>2</sub> 浓度影响

本实验生育期内 CO<sub>2</sub> 地下浓度平均值在 639.0—2325.5ppm 之间。覆膜处理地下 CO<sub>2</sub> 浓度显著高于不覆膜处理, 表明覆膜处理可以显著增加 CO<sub>2</sub> 产生, 减缓 CO<sub>2</sub> 释放速率, 提高地下 CO<sub>2</sub> 浓度; 李世清等人在 2003 年的实验<sup>[23]</sup>结果也支持此结论。地膜覆盖后, 表层土壤温度增高, 水分条件改善, 微生物活动旺盛, 必然会使土壤有机质分解加快, 从而导致 CO<sub>2</sub> 产生加剧。

覆膜处理在苗期能够显著提高 CO<sub>2</sub> 通量。这与 2003 年李世清等人实验结果一致<sup>[23]</sup>。地膜覆盖的增温效应与作物生长期有关: 生长前期, 因地面覆盖度低, 增温作用减弱; 生长中期, 植物覆盖度增加, 增温作用减弱; 生长后期, 叶片干枯, 地面覆盖度减小, 增温效果又趋增加<sup>[24]</sup>。本实验中生育期后期未观察到覆膜处理的显著作用, 可能是由于作物生长后期, 地膜的老化与损坏, 隔热性降低导致的。

#### 3.4 施氮肥处理对 CO<sub>2</sub> 通量及地下 CO<sub>2</sub> 浓度影响

本实验中施加氮肥能够显著提高地下 CO<sub>2</sub> 浓度, 而氮肥对于 CO<sub>2</sub> 通量的影响并不显著。前人也有过很多氮肥对土壤呼吸影响的研究, 结果有的是促进<sup>[25]</sup>, 有的是抑制<sup>[26]</sup>, 或者无影响<sup>[27]</sup>。在生态系统中添加氮肥可能影响土壤呼吸的几个过程。因而土壤呼吸对于氮肥的响应机制会随地点、土壤类型和植被盖度的不同而不同。

### 3.5 土壤含水量对 CO<sub>2</sub> 通量的影响

在不覆膜条件下, 整个生长期内的土壤水分含量和 CO<sub>2</sub> 通量呈显著正相关, 拟合结果为指数型增长。前人也做过水分影响土壤呼吸的研究, 由于试验方法和标准的不一致以及影响土壤呼吸的因素的多样性, 结果有较大的差异, 有正相关、负相关, 或者两者无显著相关。而本实验结果与黄秉才等 1999 年在中亚热带的实验结果<sup>[28]</sup>相符, 都呈显著正相关。土壤含水量对土壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响作用仅次于土壤温度。土壤水分主要通过影响土壤温度、土壤氧化还原电位(Eh)、孔隙度或土壤通气状况等来影响 CO<sub>2</sub> 的产生与排放。

### 3.6 DOC 对 CO<sub>2</sub> 通量的影响

郭李萍在 2011 年的田间试验结果发现土壤可溶性碳与 CO<sub>2</sub> 排放通量并无显著性相关<sup>[11]</sup>, 而本实验结果观测到生长期土壤可溶性碳与土壤 CO<sub>2</sub> 通量呈显著正相关, 这与 Franzluebbers et al.在 2001 年的实验结果趋势相同。土壤中可溶性有机碳主要包括溶解在土壤溶液中不同种类的低分子量有机质和以胶体状悬浮于土壤溶液中的大分子量有机质, 是土壤微生物活动能量的主要来源, 土壤中 DOC 浓度提高能够加剧微生物呼吸, 从而促进 CO<sub>2</sub> 的释放。

综上所述, 影响土壤呼吸的因素有很多, 包括温度、水分、土壤养分(氮肥、可溶性碳)、耕作方式(覆膜方式), 而这些因素往往又是相互作用、相互影响的, 因此土壤呼吸共同受这些因素的交互影响。

## 4 结论

在黄土高原半干旱丘陵区玉米农田的土壤呼吸日变化为双峰模式。覆膜处理在玉米苗期能够显著提高土壤呼吸, 而施加氮肥对土壤呼吸的变化没有明显影响。温度、水分、土壤养分(氮肥、可溶性碳)、耕作方式(覆膜方式)等因素能够同时影响土壤呼吸速率。为了进一步了解覆膜管理对土壤呼吸的影响, 以及各因素之间的相互作用, 必须建立基于过程的土壤呼吸模型, 这也是本研究未来的研究方向。

### [参考文献] (References)

- [1] 郝庆菊,王跃思,宋长春等.三江平原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放的初步研究[J].农业环境科学学报.2004, 23(5): 846-854.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] IPCC. Climate change 2001:The scientific basis[R].New York, USA: Cambridge University Press,2001:12-14.
- [4] J W RAICH, W H SCHLESINGER. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology. 1992(44B):81-99.
- [5] Prosperi C, Luna C, Fernandez E, et al. Influence of pH, light intensity and oxygen on the short-term effect of ammonium on nitrogenase activity of cyanobacteria from rice fields [J].Environmental and Experimental Botany, 1993, 33(4):545-552.
- [6] Phil I, Maria F C, Roland B, et al. Quantification of soil carbon inputs under elevated CO<sub>2</sub>:C3 plant in a C4 soil [J].Plant and soil, 1995, 187(2):345-350.
- [7] Yiqi Luo, Xuhui Zhou. Soil Respiration and the Environment[M].2007,67-89.
- [8] 李琳,张海林,陈阜,等.不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系 [J].应用生态学报, 2007,18(12):2765-2770.
- [9] 依艳丽,梁运江,张大庚.不同水肥处理对辣椒保护地土壤温度和 CO<sub>2</sub> 含量的影响 [J].土壤通报,2006,37(5): 875-880.
- [10] 董玉红,欧阳竹,李运生,等.肥料施用及环境因子对农田土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 [J].农业环境科学学报,2005,24(5): 913-918.

- [11] 郭李萍.农田温室气体排放通量与土壤碳汇研究 [D].北京:中国农业科学院, 2000.
- [12] 山仑,陈国良,1993.黄土高原旱地农业的理论与实践 [M].北京:科学出版社,1993.
- [13] 李凤民,徐进章,孙国钧,2003.半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业的发展.生态学报,23(9),1901-1909.
- [14] Tian Y, Li F M, Liu P H. Economic analysis of rainfall water harvesting and irrigation methods, with an example from China [J].Agriculture Water Management, 2003, 60(3):217-226.
- [15] Li S, Kang S Z, Li F H, Zhang L, Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China [J]. Agriculture Water Management, 2008, 95(11):1214-1222.
- [16] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China [J].Field Crops Research,2009,96(3):74-82.
- [17] 高益群,张高平,陈祖贵等.旱作农业技术引发的革命—甘肃省通渭县的实践 [J].发展,2008:10:5-6.
- [18] 赵聚宝,李克煌.干旱与农业 [M].北京:中国农业出版社,1995.
- [19] Subrahmaniyan K, Kalaiselvan P, Balasubranmanian TN. Microclimate variations in relations to different types of polyethylene-film mulch on growth and yield of groundnut(*Arachis hypogaea*)[J]. Indian Journal Of Agronomy, 2008,53(3):184-188.
- [20] Liu CA, Jin SL, Zhou LM, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters [J].European Journal Of Agronomy,2009,31(4):241-249.
- [21] Lehuger S, Gabrielle B, Cellier P, et al. Predicting the net carbon exchanges of crop rotations in Europe with an agro-ecosystem mode [J]. Agriculture, Ecosystem&Environment, 2010, 139 (3):384-395.
- [22] Graefe J. Simulation of soil heating in ridges partly covered with plastic mulch, part I:Energy balance model [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(3):391-407.
- [23] 李世清,李东方,等.半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J],2003,31(5):21-28
- [24] 陈锡时,郭树凡,汪景宽,等.地膜覆盖栽培技术对土壤微生物种群和生物活性的影响[J], 1998,9 (4) : 435-439.
- [25] Wang CY, Wang SB, Gu JX, et al. Soil respiration in maize fields in the lower reaches of Liao he Plain. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25( 5):1240- 1244.
- [26] Ding WX, Cai Y, Cai ZC, et al. Soil respiration under maize crops: Effects of water, temperature, and nitrogen fertilization. Soil Science Society of America Journal,2007, 71: 944- 951.
- [27] Kou T, Zhu J, Xie Z, et al. Effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on soil and root respiration in winter wheat by using a respiration partitioning chamber. Plant and Soil, 2007, 299: 237- 249.
- [28] Huang CC, Ge Y, Chang J, Lu R, Xu QS. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. Acta-Ecologica Sinica, 1999,324 -328.