

保护性耕作下大豆农田土壤呼吸及影响因素分析*

张 赛 罗海秀 王龙昌** 张晓雨 周航飞 马仲炼 李榜江

(西南大学农学与生物科技学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室 南方山地农业教育部工程研究中心 重庆 400716)

摘 要 为了探讨保护性耕作对旱作农田土壤呼吸的影响,采用 LI6400-09 仪器(LI6400 便携式光合作用系统连接 6400-09 呼吸室)在重庆北碚西南大学试验农场对平作(T)、垄作(R)、平作+覆盖(TS)、垄作+覆盖(RS)、平作+覆盖+秸秆速腐剂(TSD)、垄作+覆盖+秸秆速腐剂(RSD)6 种处理下的西南紫色土丘陵区小麦/玉米/大豆套作体系中大豆生长季节的土壤呼吸及其水、热、生物因子进行测定和分析,探讨西南丘陵区保护性耕作下大豆农田土壤呼吸及其影响因素。结果表明,大豆整个生育期内土壤呼吸先缓慢增强,到开花期开始增长迅速,成熟期明显下降。不同处理土壤呼吸速率存在差异,表现为 $T < R < TS < RS < TSD < RSD$ 。垄作和秸秆覆盖均提高了土壤呼吸作用。各处理 10 cm 土层的土壤温度表现为 $T > TSD > TS$ 、 $R > RSD > RS$,土壤呼吸的土温敏感指标 Q_{10} 值排序为 $TS > TSD > RS = R > T > RSD$ 。秸秆覆盖处理的土壤呼吸对于土壤温度敏感性较高,垄作则降低了土壤温度敏感性。5 cm 土层的土壤含水量高低排序为 $TSD > RSD > TS > RS > T > R$ 。本研究中土壤呼吸与土壤水分呈抛物线函数关系,垄作处理下土壤呼吸与土壤水分正相关,达到显著水平;其他处理均表现负相关,其中 TS 达到极显著水平。在大豆农田生态系统中优势类群有弹尾目、螨目和双翅目,干漏斗法、陷阱法捕获的土壤动物与土壤呼吸均没有显著的相关关系,两种方法所得土壤动物数量加总与土壤呼吸进行相关分析,发现处理 T 相关系数达到显著水平, $r=0.901$, $P=0.037$ 。

关键词 大豆农田 保护性耕作 土壤呼吸 土壤温度 土壤湿度 土壤动物

中图分类号: S15 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)08-0913-08

Analysis of soil respiration and the influencing factors in soybean fields under conservation tillage

ZHANG Sai, LUO Hai-Xiu, WANG Long-Chang, ZHANG Xiao-Yu,
ZHOU Hang-Fei, MA Zhong-Lian, LI Bang-Jiang

(College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University; Key Laboratory of Eco-environments of the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education; Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Chongqing 400716, China)

Abstract The effects of conservation tillage on soil respiration in dry croplands were investigated in the southwest purple hilly region. The LI6400-09 respiratory chamber was used in the experiment conducted in the experimental field of Southwest University, Beibei, Chongqing. The respiration, hydrothermal and biotic factors of soil were measured and analyzed during soybean growth period in a wheat-maize-soybean triple intercropping system. There were six treatments and each treatment replicated three times. The treatments included traditional tillage (T), ridge tillage (R), traditional tillage + straw mulching (TS), ridge tillage + straw mulching (RS), traditional tillage + straw mulching + decomposing inoculants (TSD) and ridge tillage + straw mulching + decomposing inoculants (RSD). The results suggested that soil respiration rate initially increased slowly after planting. It then increased rapidly at blossoming stage and decreased steadily at maturity of soybean. Differences were noted in soil respiration rate among different treatments and soil respiration order was $T < R < TS < RS < TSD < RSD$. Ridge tillage and straw mulching improved soil respiration in soybean fields. Soil temperature in 10 cm soil layer was in the order of $T > TSD > TS$ and $R > RSD > RS$.

* 国家自然科学基金项目(31271673, 30871474)和重庆市科技攻关项目(CSTC, 2008AB1001)资助

** 通讯作者: 王龙昌(1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为生态农业与可持续发展、资源利用与高效农作制度、节水农业理论与技术。E-mail: wanglc2003@163.com

张赛(1987—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为生态农业与可持续发展。E-mail: 532875132@qq.com

收稿日期: 2013-02-17 接受日期: 2013-04-02

Q_{10} value, a sensitive indicator of soil respiration to temperature, was in the order of $TS > TSD > RS = R > T > RSD$. Q_{10} increased under straw mulching, but the opposite occurred under ridge tillage. Soil moisture order in 5 cm soil layer was $TSD > RSD > TS > RS > T > R$. Soil respiration and soil moisture had parabolic function relationship, with significant correlation coefficient under R treatment. Other treatments showed negative correlations, with an extreme significant level under TS treatment. The dominant groups of soil animals in soybean fields included Collembola, Acarina and Diptera. There was no significant correlation between soil respiration and soil animals captured by tullgren apparatus and pitfall traps method. When the soil animals numbers captured by two methods were added together, the correlation coefficient under T was significant ($R = 0.901$ at $P = 0.037$).

Key words Soybean field, Conservation tillage, Soil respiration, Soil temperature, Soil moisture, Soil animal

(Received Feb. 17, 2013; accepted Apr. 2, 2013)

在全球气候变化的大背景下, 伴随着极端天气气候事件发生频率和强度的增强, 气候变化给人类社会活动带来深刻的负面影响。以低能耗、低污染为基础的“低碳经济”成为全球热点。在全球碳循环研究中, 土壤呼吸是土壤向大气释放 CO_2 的过程, 是陆地生态系统将碳素以 CO_2 形式归还给大气的主要途径, 是土壤有机碳输出的主要形式和土壤与大气交换的主要环节, 占陆地生态系统与大气之间碳交换量的 $2/3$ ^[1]。土壤呼吸的影响因素复杂多样, 许多学者对土壤呼吸的水热影响因子进行了观测和模拟^[2], 已经有了广泛的认识。严格意义上的土壤呼吸是指受扰动的土壤产生 CO_2 的所有代谢作用, 包括 3 个生物学过程(植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用)^[3]。一般认为在土壤呼吸中以植物根系呼吸和土壤微生物呼吸为主, 另外两种代谢作用对土壤呼吸的影响较少, 但是最近有学者却呼吁土壤动物呼吸不可忽略, 尤其在农田生态系统中, 无脊椎动物等往往起着决定性作用。农田生态系统作为最活跃的碳库, 目前我国有关农田生态系统土壤动物的研究主要集中在土壤动物分类和群落分布特征上^[4]。在全球变化日益严峻的形势下, 土壤动物与环境的关联研究显得越来越重要^[5]。国内外陆续研究了土壤动物与全球变化之间的关系^[6-9], 包括土壤动物对土壤污染和土地利用方式的响应^[10-13], 物种入侵、土壤干扰等多方面^[14-15]。而土壤动物与温室气体排放结合研究较为薄弱^[16]。保护性耕作措施作为当今推广应用的一项重要农业管理措施, 具有减少土壤侵蚀、提高土壤有机质、节水保墒和提高产量的优点, 但是对温室气体的排放研究影响机制仍处于起步阶段^[17]。基于此, 本研究旨在通过分析保护性耕作下大豆农田土壤呼吸的影响因素, 从土壤温度、土壤湿度和农田土壤动物这 3 个角度, 探讨保护性耕作下农田生态系统的土壤呼吸特征, 为减缓全球变暖提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于重庆市北碚区西南大学教学试验农场, $29^{\circ}51'N$, $106^{\circ}27'E$, 海拔 244 m, 属亚热带季风湿润气

候, 年均太阳总辐射量 $87\ 108\ kJ\cdot cm^{-2}$, 年均总日照时数 1 276.7 h, 多年平均气温 $18\ ^{\circ}C$, $\geq 10\ ^{\circ}C$ 积温 $5\ 979.5\ ^{\circ}C$, 夏季最高气温达 $40\ ^{\circ}C$ 左右, 无霜期 359 d, 多年平均降雨量 1 133.7 mm, 春、夏、秋、冬降雨量分别为全年的 25.5%、41.4%、27.9%、5.5%, 年蒸发量 1 181.1 mm, 伏旱发生频率 93%。土壤为旱地紫色土, 坡度较缓, 地力相对均匀。土壤容重 $1.21\ g\cdot cm^{-3}$, pH 为 6.47, 土壤有机质 $28.00\ g\cdot kg^{-1}$, 全氮 $1.68\ g\cdot kg^{-1}$, 全磷 $1.46\ g\cdot kg^{-1}$, 全钾 $34.54\ g\cdot kg^{-1}$, 速效磷 $18.13\ mg\cdot kg^{-1}$, 速效钾 $270.23\ mg\cdot kg^{-1}$, 碱解氮 $35.23\ mg\cdot kg^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验于 2012 年 5—10 月进行, 采用“小麦/玉米/大豆”3 熟复种轮作模式, 试验地已连续 6 年开展旱 3 熟种植模式下的保护性耕作研究, 前两年是“小麦/玉米/红薯”, 每年的耕作处理保持一致。共设 6 个处理(表 1), 3 次重复, 试验采用随机区组排列, 每个小区面积为 $8\ m \times 3.6\ m$, 均分 4 厢, 每厢宽度为 1 m, 长度为 3.6 m。供试作物为小麦(“糯麦一号”, 播种量 $90\ kg\cdot hm^{-2}$)、玉米(“西单一号”, 移栽密度 $88\ 933\ 株\cdot hm^{-2}$)和大豆(“渝豆一号”, 播种量 $115\ kg\cdot hm^{-2}$)。小麦采取撬窝点播, 每条带 3 行, 每行 17 窝, 各处理均施过磷酸钙 $390\ kg\cdot hm^{-2}$ 、尿素 $152\ kg\cdot hm^{-2}$, 作为基肥在播种的同时施入。玉米生育期各处理均施复合肥 $148\ kg\cdot hm^{-2}$, 尿素 $74\ kg\cdot hm^{-2}$, 作为基肥在移栽玉米时施入。玉米采用育苗移栽, 每条带两行, 每行 8 窝, 每窝 2 株, 总计每小区 128 株。大豆实行撬窝点播, 每条带 3 行, 每行 12 窝, 各处理均施复合肥 $300\ kg\cdot hm^{-2}$ 。小麦和玉米间厢种植, 小麦收获后在原来种植小麦的厢内播种大豆。覆盖处理所用的玉米及小麦秸秆, 收获后均匀覆盖于小区内, 每小区覆盖秸 $42.7\ kg$ (折合 $24\ 000\ kg\cdot hm^{-2}$)。秸秆速腐剂处理中, 采用由广州农冠生物科技有限公司提供的农运来堆肥专用菌种, 速腐剂剂量为秸秆量的 0.2%。田间管理措施同常规。

1.3 指标测定方法

1.3.1 土壤呼吸测定

测定仪器为 LI6400 便携式光合作用系统连接 6400-09 呼吸室, 在测定区域按照行间、株间和条带边缘 3 个不同位置选取 3 个固定点, 间距约为 1 m, 每个

表 1 试验处理描述
Table 1 Treatments descriptions

代码 Code	处理 Treatment	具体措施 Specific measures
T	平作 Traditional tillage	整个试验期传统耕作 Traditional tillage throughout the experimental period
R	垄作 Ridge tillage	在每茬作物播种(移栽)前起垄, 垄高 20 cm, 作物种植在垄上 Ridging before seeding (transplanting) with the height of 20 cm, and planting crops on the ridges
TS	平作+覆盖 Traditional tillage + straw mulching	整个试验期传统耕作, 收获的秸秆全量就地覆盖 Traditional tillage throughout the experimental period, and mulching with all straw after harvesting
RS	垄作+覆盖 Ridge tillage + straw mulching	整个试验期起垄, 收获的秸秆全量就地覆盖 Ridge tillage throughout the experimental period, and mulching with all straw after harvesting
TSD	平作+秸秆+秸秆速腐剂 Traditional tillage + straw mulching + decomposing inoculants	整个试验期传统耕作, 收获的秸秆全量就地覆盖并添加秸秆速腐剂 Traditional tillage throughout the experimental period, mulching with all straw after harvesting, and adding decomposing inoculants
RSD	垄作+覆盖+秸秆速腐剂 Ridge tillage + straw mulching + decomposing inoculants	整个试验期起垄, 收获的秸秆全量就地覆盖并添加秸秆速腐剂 Ridge tillage throughout the experimental period, mulching with all straw after harvesting, and adding decomposing inoculants

点放自制的 PVC 环, 于测定前一天安置好, 以减少对土壤的干扰。每个 PVC 环测定 1 次, 3 个循环, 每个处理 3 次重复, 共 9 个数据, 取其平均值作为日土壤呼吸值。大豆整个生育期内每半个月测定 1 次, 如遇下雨天气则适当调整, 测定时间统一为上午 9:00—11:00。

1.3.2 土壤水热因子测定

测定土壤呼吸时同步测定土壤温度和土壤水分, 其中土壤温度采用 LI6400-09 自带的土壤温度探针测定, 插入土壤的深度为 10 cm。土壤水分测定是在 PVC 环附近采集 0~5 cm 深度的土样, 立即带回实验室采用烘干法测定, 3 次重复。

1.3.3 土壤动物测定

为探明垄作和秸秆覆盖措施对土壤动物的影响, 从大豆播种到收获期, 对不同处理的土壤动物进行测定。0~10 cm 土层按照五点法取样后立即带回实验室, 采用“干漏斗法”(tullgren apparatus)进行分离, 每月 1 次; 采用“陷阱法”捕获地面土壤动物, 每月 1 次。为了降低因分离时间造成的误差, 其中“干漏斗法”只对 T、R、TS、RS 4 个处理进行分析。土壤动物分类采用《中国土壤动物检索图鉴》^[18], 鉴定到目, 同时统计个体数量。个体数占捕获数总数 10% 以上的为优势类群, 1%~10% 为常见类群, 不足 1% 为稀有类群。分别从多样性指数 (Shannon-Wiener, H)、均匀度指数 (Pielou, E)、优势度指数 (Simpson, C) 和丰富度指数 (Menhinick, D) 进行比较分析^[19]。

$$H = -\sum(P_i \ln P_i) \quad (1)$$

$$E = H / \ln S \quad (2)$$

$$C = \sum(P_i)^2 \quad (3)$$

$$D = \ln S / \ln N \quad (4)$$

式中: $P_i = n_i / N$, n_i 为第 i 个类群的个体数; N 为群落中

所有类群的个体总数; S 为类群数。

1.4 数据处理

所有数据处理在 SPSS 13.0 和 Excel 2003 表格中完成统计分析和制图。其中土壤温度与土壤呼吸的关系计算公式^[20]为:

$$Y = a \times e^{bx} \quad (5)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (6)$$

式中: Y 为土壤呼吸速率, 单位为 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 即每平方米土壤每天排放的 CO_2 含碳量; x 为土壤温度 ($^{\circ}C$); Q_{10} 为土壤呼吸的土温敏感指标, 即温度每增加 $10^{\circ}C$ 土壤呼吸增加的倍数; a 和 b 为模拟计算值。

2 结果与分析

2.1 农田土壤呼吸特征

从大豆播种到结荚期土壤呼吸不断增强, 其中分枝期(7 月 26 日)之前土壤呼吸变化不大, 分枝期开始土壤呼吸逐渐上升, 到结荚期(9 月 8 日)达到最大, 收获期(10 月 17 日)土壤呼吸明显降低(图 1), 降低幅度达 62%~84%, 其原因是大豆成熟后期土壤温度较低, 土壤微生物活动减弱, 同时因连续下雨土壤含水量较高, 一定程度上抑制了土壤呼吸。大豆收获前 80% 左右的叶片变黄脱落, 地上部分和地下部分生长缓慢, 根系对土壤呼吸的贡献减弱。不同处理土壤呼吸速率存在差异, T、R、TS、RS、TSD、RSD 日均土壤呼吸分别为 $3.242 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.434 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.860 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $4.185 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $4.374 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $4.948 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 表现为 $T < R < TS < RS < TSD < RSD$ 。在大豆不同生育期内, 与对照相比, 除个别情况外, 垄作处理均在不同程度上提高了土壤呼吸速率, 影响幅度为 $-0.06\% \sim 20.04\%$ 。秸秆覆盖的土壤呼吸较对照提高 $6.45\% \sim 29.75\%$, 垄作+秸秆覆盖提高 $6.91\% \sim 51.86\%$ 。速腐剂的添加能在一定范围增加土壤呼吸, 土壤呼吸

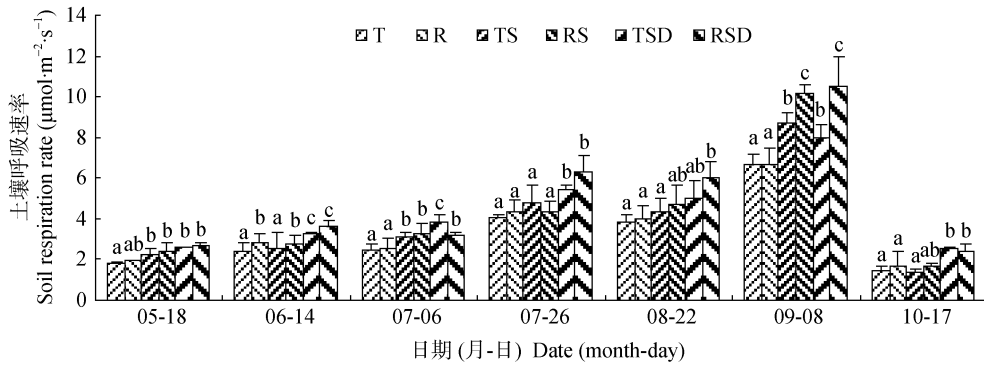


图 1 不同处理大豆田土壤呼吸速率动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil respiration rate in soybean field under different treatments

速率相对于对照的变动幅度为-7.87%~83.07%。因此，大豆农田垄作和秸秆覆盖均提高了土壤呼吸作用。

2.2 土壤水热因子与土壤呼吸的关系

大豆整个生长季大气温度、气室温度和土壤温度先上升后降低，秸秆覆盖下的土壤温度较低(图

2)。但是 7 月 26 日、8 月 22 日和 10 月 17 日 3 次取样中秸秆覆盖下的土壤温度与对照相差不大，甚至有的略高于对照，气温过低时秸秆覆盖能有效提高土壤温度。各处理土壤温度大小排序为 T>TSD>TS、R>RSD>RS。垄作与平作之间没有明显的高低顺序。

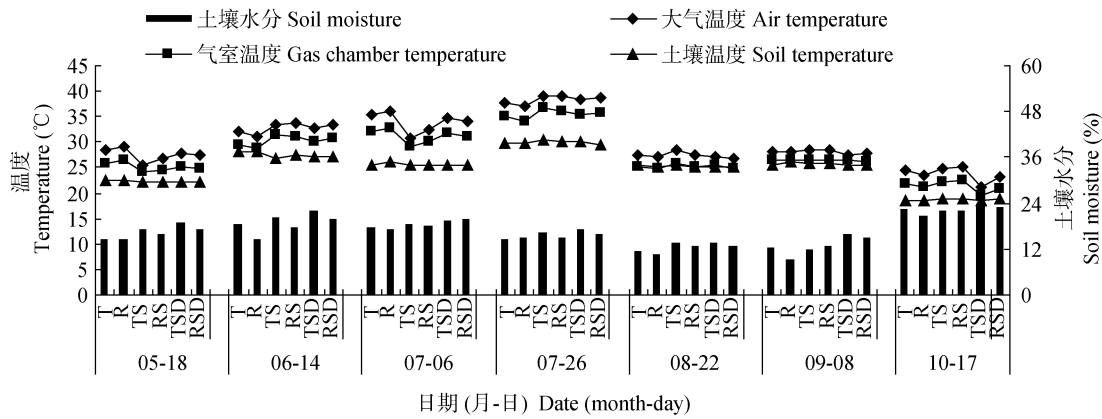


图 2 不同处理土壤水热因子、采样箱温度及大气温度的动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil hydrothermic factor, sampling chamber temperature and air temperature under different treatments

以往的研究表明，土壤呼吸速率对温度变化的敏感性指标通常为 1.3~5.6^[21]。相关性分析表明，本研究中土壤呼吸速率与土壤温度关系符合指数函数规律，各处理方程式参数指标见表 2。6 个处理(T、R、TS、RS、TSD、RSD)的 Q_{10} 值分别为 2.34、2.41、2.69、2.41、2.53、2.25，表明垄作和秸秆覆盖处理均提高了土壤呼吸的土温敏感性，速腐剂的添加降低了这种趋势。

表 2 不同处理土壤呼吸速率与土壤温度的关系方程
Table 2 Relation equations of soil respiration rate and soil temperature under different treatments

处理 Treatment	a	b	R ²	P	Q ₁₀
T	0.344	0.085	0.512	0.000	2.34
R	0.357	0.083	0.429	0.002	2.41
TS	0.279	0.099	0.461	0.001	2.69
RS	0.407	0.083	0.405	0.003	2.41
TSD	0.340	0.093	0.537	0.000	2.53
RSD	0.451	0.081	0.289	0.014	2.25

样本数为 20。Sample number is 20.

土壤水分除 10 月 17 日较高，其余时间变化平缓。各处理土壤水分差异显著，表现为 TSD>RSD>TS>RS>T>R(图 2)。相关研究表明，当土壤湿度低于田间持水量的 40%或者高于 80%时，土壤呼吸将下降^[22]。因此根据抛物线型函数的数学意义，对土壤呼吸和土壤水分进行二次函数模拟，结果表明，T、R、TS、RS、TSD、RSD 6 个处理土壤呼吸与土壤含水量之间抛物线曲线的相关系数 R 依次为 -0.694(P=0.084)、0.806(P=0.028)、-0.877 (P=0.010)、-0.718(P=0.069)、-0.712(P=0.073)、-0.688 (P=0.088)。垄作处理下土壤呼吸与土壤水分正相关，达到显著水平；其他处理均表现负相关关系，其中 TS 达到极显著水平。

2.3 土壤动物与土壤呼吸的关系

在 7 次取样中，采用干漏斗法分离得到的土壤动物共计 3 296 个，种类 14 种。其中弹尾目、螨目和双翅目为优势类群，鞘翅目、膜翅目、线蚓科和唇足纲是常见类群，其余为稀有类群(表 3)。

表 3 不同处理对土壤动物数量的影响
Table 3 Influence of different treatments on soil animals

动物种类 Animal group	T(CK)		R		TS		RS	
	数量 Number	比例 Proportion (%)	数量 Number	比例 Proportion (%)	数量 Number	比例 Proportion (%)	数量 Number	比例 Proportion (%)
弹尾目 Collembola	512	72.83	384	67.02	709	68.37	640	65.11
螨目 Acarina	70**	9.96	77**	13.44	135**	13.02	206**	20.96
双翅目 Diptera	56 [^]	7.97	58 [^]	10.12	100 [^]	9.64	88 [^]	8.95
鞘翅目 Coleoptera	9	1.28	10	1.75	16	1.54	13	1.32
蜘蛛目 Araneae	4	0.57	5	0.87	6	0.58	5	0.51
膜翅目 Hymenoptera	9	1.28	8	1.40	8	0.77	7	0.71
唇足纲 Chilopoda	7	1.00	13	2.27	28	2.70	11	1.12
线蚓科 Line caecilians	24	3.41	8	1.40	17	1.64	4	0.41
单向蚓目 Unidirectional caecilians	2	0.28	1	0.17	4	0.39	2	0.20
蛭类 Leeches	0	0.00	1	0.17	1	0.10	0	0.00
倍足纲 Diplopoda	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	0.10
等足目 Isopoda	5	0.71	5	0.87	4	0.39	3	0.31
直翅目 Orthoptera	4	0.57	3	0.52	9	0.87	3	0.31
蜗牛 Snail	1	0.14	0	0.00	0	0.00	0	0.00
合计 Total	703 [*]	100.00	573 [*]	100.00	1 037 [*]	100.00	983 [*]	100.00

**表示在 0.01 水平上差异显著, *表示在 0.05 水平上差异显著。 ** indicates significant difference at 0.01 level, * indicates significant difference at 0.05 level.

在农田生态系统中, 生态系统的稳定性对提高农作物产量和保护生态环境意义重大, 与对照相比, 垄作和秸秆覆盖措施均有利于土壤动物多样性指数的提高(表 4), 有利于提高整个农田生态系统的稳定性。

表 4 不同处理下土壤动物多样性指数的比较
Table 4 Comparison of soil animals diversity indices of different treatments

多样性指数 Diversity index	T(CK)	R	TS	RS
<i>H</i>	1.055	1.178	1.138	1.070
<i>E</i>	0.425	0.474	0.458	0.431
<i>C</i>	0.548	0.479	0.495	0.476
<i>D</i>	0.379	0.391	0.358	0.361

从每次调查的土壤动物数量分析(图 3), 第 4 次和第 5 次土壤动物数量较少, 这是由于收获玉米等人类活动造成的。可见人类活动对土壤动物的影响非常强烈, 秸秆覆盖在一定程度上降低了土壤动物受到人类活动的干扰程度。干漏斗法捕获的土壤动物秸秆覆盖处理多于无秸秆覆盖处理, 但陷阱法捕获的土壤动物没有表现出一致的现象(图 3b)。说明秸秆覆盖虽然增加了土壤动物的食物来源, 但由于空间阻碍影响了地表土壤动物的活动, 没有秸秆覆盖的处理中地表的土壤动物活动更加频繁。

土壤动物数量与土壤呼吸相关分析结果表明,

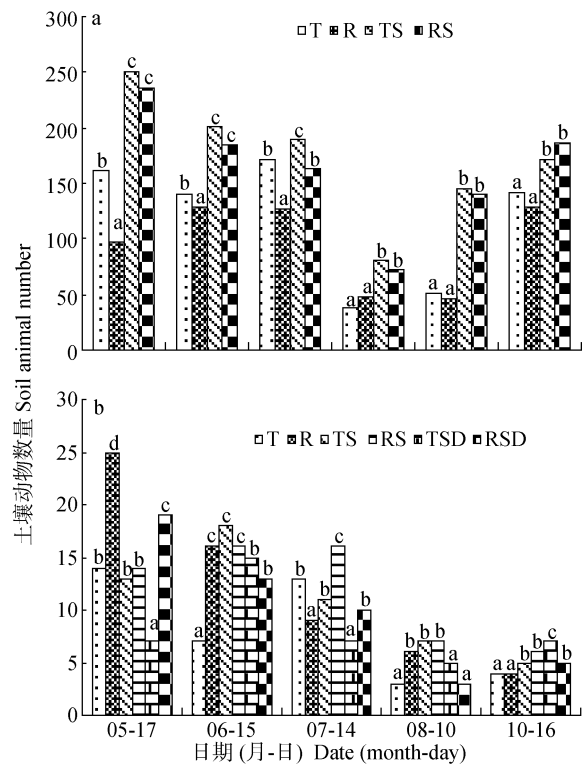


图 3 不同处理干漏斗法(a)和陷阱法(b)捕获的土壤动物数量
Fig. 3 Number of soil animals captured by tullgren apparatus (a) and pitfall traps (b) methods under different treatments

干漏斗法下两者相关性不显著, 陷阱法下两者也不存在显著相关关系。将同一时期的土壤动物总数相加, 再与土壤呼吸进行相关分析, 发现只有处理 T 相关系数达到显著水平, $r=0.901, P=0.037$ 。

3 讨论

土壤呼吸的影响因素很多, 主要因子包括土壤温度、土壤湿度、土壤有机体含量、土地利用、施肥、土壤质地、种植作物、土壤生物等, 既有环境因子, 又有土壤本身的影响。各因素之间并不是孤立存在的, 不仅同时对土壤呼吸产生影响, 而且他们之间也有相互影响^[21]。上述分析可以看出大豆整个发育阶段土壤呼吸先增强再减弱, 土壤温度持续上升, 土壤水分变化平缓, 三者之间不是简单的线性关系, 单一因子模型无法全面地解释土壤呼吸, 需要建立各因素耦合关系模型才能更加科学合理地解释土壤呼吸^[23]。

3.1 保护性耕作下土壤呼吸速率

前人已经对保护性耕作下土壤呼吸速率进行了研究, 由于地区气候、土壤、种植模式的不同, 得到的结论并不统一。本研究表明, 秸秆覆盖处理在不同作物中对土壤呼吸的影响趋势一致, 均不同程度增强了土壤呼吸, 且到秸秆分解后期对土壤呼吸的影响逐渐减弱。这与以往的研究结论一致, 一般认为秸秆还田会促进土壤中 CO_2 的释放^[24]。官情等^[25]在黄土旱塬区观测表明, 冬小麦农田土壤呼吸在秸秆覆盖措施下显著高于对照。张庆忠等^[26]在田间对比试验表明, 随着秸秆还田量的增加, 土壤呼吸速率显著增加, 且在秸秆还田后随着时间的推移增加效应逐渐减小。王同朝^[27]等研究了雨养条件下冬小麦-夏玉米农田土壤呼吸, 指出土壤呼吸在不同作物垄作与传统耕作对土壤呼吸的影响效果相反, 而且在同种作物不同生育期也不同: 在小麦生育期内灌浆期以前垄作高于传统耕作, 成熟期相反; 在玉米生育期内垄作均高于传统耕作。本研究得出的旱地大豆生育期内农田土壤呼吸从播种到收获期持续增强, 收获期开始大幅度减弱。原因是后期植株根系生长开始下降, 根长和根重均减少^[28], 而根呼吸通常占土壤总呼吸的 50% 左右, 在不同研究中该比例为 10%~90% 不等^[22]。垄作提高土壤呼吸速率最高可达 20.04%, 秸秆覆盖较对照提高了土壤呼吸的 6.45%~29.75%。垄作+秸秆覆盖提高了土壤呼吸的 6.91%~51.86%, 速腐剂的添加能在一定范围增加土壤呼吸, 土壤呼吸速率的变动幅度为 -7.87%~83.07%。因此, 在大豆农田垄作和秸秆覆盖均提高了土壤呼吸。

3.2 土壤水热因子对土壤呼吸的影响

土壤温度和水分是土壤呼吸最重要的影响因素, 农田生态系统土壤呼吸与土壤温度的关系有指数函数、线性函数、幂函数、抛物线等, 不同学者所用的拟合模型不尽相同^[29-31]。其中采用指数模型最普

遍, 利用 Q_{10} 指数模型能够很好地反映土壤呼吸与土壤温度之间的关系。本研究得出 6 个处理(T、R、TS、RS、TSD、RSD)的 Q_{10} 值分别为 2.34、2.41、2.69、2.41、2.53、2.25, 垄作和秸秆覆盖处理均提高了土壤呼吸的土温敏感性, 速腐剂的添加降低了这种趋势。土温敏感性越高, 表明较低土壤温度将带来较大的土壤呼吸的降低幅度。各处理土壤温度大小排序为 $T>TSD>TS, R>RSD>RS$, 秸秆覆盖措施降低了土壤温度, 同时也有助于 CO_2 的减排。

土壤水分影响土壤中所进行的所有反应和过程, 土壤微生物的活性、土壤养分的迁移变化等与土壤水分密切相关。部分学者用抛物线函数、线性函数、指数函数等形式拟合了土壤呼吸与土壤水分的关系^[32-34]。本研究模拟的 5 cm 土壤水分与土壤呼吸表现为抛物线函数, 结果表明 T、R、TS、RS、TSD、RSD 6 个处理土壤呼吸与土壤含水量之间抛物线曲线决定系数依次为 -0.694($P=0.084$)、0.806($P=0.028$)、-0.877($P=0.010$)、-0.718($P=0.069$)、-0.712($P=0.073$)、-0.688($P=0.088$)。垄作处理下土壤呼吸与土壤水分正相关, 达到显著水平, 其他处理均表现负相关关系, 其中 TS 达到极显著水平。根据抛物线函数的数学意义, 在抛物线顶点的两侧土壤呼吸与土壤水分存在两种相反的相关关系, 垄作处理下土壤水分较低, 如果遇到降雨则引起土壤呼吸的增强, 但添加秸秆之后, 土壤呼吸作用随着降雨的发生而受到抑制。

3.3 土壤动物对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是一种复杂的生物学过程, 受多种因素的影响, 包括植被类型、净生态系统生产力、地下和地上生物量的分配、凋落物、种群和群落的相互作用和土壤动物等^[35]。有研究表明土壤微生物呼吸占土壤呼吸的 70% 左右^[36], 土壤有机质中的易变碳库是土壤呼吸的主要驱动力, 它比稳定碳库积累速率更快, 氧化成 CO_2 的风险也大^[37]。土壤呼吸受土壤微生物量碳的影响较大^[38], 而土壤动物作为生态系统中重要的物质分解者, 对改变土壤碳库、物质迁移和能量转化具有重要作用。全球变暖的趋势日益显著, 而土壤动物对生态系统的碳循环有着重要的调节作用。由于开展的相关研究较少, 土壤动物对土壤呼吸的影响、排放机制以及反馈效应的研究比较薄弱。在土壤呼吸组分的分离测定中, 土壤动物只是其中一个方面, 且采用干漏斗法只能捕获到部分中小型土壤动物, 陷阱法只能捕获到活动在地表的弹跳力不强的土壤动物。本研究所得的土壤动物并没有囊括土壤中的所有动物, 大型、微型土壤动物和土壤微生物以及全体土壤动物与土壤呼吸的影响特征还有待进一

步研究。另外本研究没能区分土壤动物对土壤呼吸的实际贡献, 仅仅分析了土壤动物数量与土壤呼吸的相关关系。同时还需要进一步开展土壤呼吸的水热生物复合因子耦合关系的研究, 从而明确土壤呼吸的影响机制, 为土壤固碳减排提供科学依据。

4 结论

大豆整个生育期内土壤呼吸先缓慢增强, 到开花期开始增长迅速, 成熟期又下降。不同处理土壤呼吸速率存在差异, 表现为 $T < R < TS < RS < TSD < RSD$ 。垄作和秸秆覆盖均提高了土壤呼吸作用。各处理 10 cm 土层的土壤温度表现为 $T > TSD > TS$ 、 $R > RSD > RS$, 土壤呼吸的土温敏感指标 Q_{10} 值排序为 $TS > TSD > RS = R > T > RSD$ 。秸秆覆盖的土壤呼吸对于土壤温度敏感性较高, 垄作则降低了土壤温度敏感性。5 cm 土层的土壤含水量为 $TSD > RSD > TS > RS > T > R$ 。本研究中土壤呼吸与土壤水分呈抛物线函数关系, 垄作处理下土壤呼吸与土壤水分正相关, 达到显著水平。其他处理均表现负相关关系, 其中 TS 达到极显著水平。在大豆田的优势动物类群有弹尾目、螨目和双翅目, 干漏斗法、陷阱法捕获的土壤动物与土壤呼吸均无显著相关性, 两种方法所得土壤动物数量加总与土壤呼吸进行相关分析, 发现处理 T 相关性达显著水平, $r=0.901$, $P=0.037$ 。

参考文献

- [1] 王永强, 崔凤娟, 郭小刚. 农田生态系统土壤呼吸文献综述[J]. 内蒙古农业科技, 2010(3): 65-67
Wang Y Q, Cui F J, Guo X G. Farmland ecosystem soil respiration literature review[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2010(3): 65-67
- [2] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 719-733
Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 719-733
- [3] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. The Botanical Review, 1997, 43(4): 449-528
- [4] 宋理洪, 武海涛, 吴东辉. 我国农田生态系统土壤动物生态学研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2898-2906
Song L H, Wu H T, Wu D H. Soil fauna ecology in China cropland ecosystems: Research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(12): 2898-2906
- [5] 王移, 卫伟, 杨兴中, 等. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2441-2448
Wang Y, Wei W, Yang X Z, et al. Interrelationships between soil fauna and soil environmental factors in China: Research advance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2441-2448
- [6] Bokhorst S, Huiskes A, Convey P, et al. Climate change effects on soil arthropod communities from the Falkland Islands and the Maritime Antarctic[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(7): 1547-1556
- [7] Convey P, Pugh P J A, Jackson C, et al. Response of antarctic terrestrial microarthropods to long-term climate manipulations[J]. Ecology, 2002, 83(11): 3130-3140
- [8] Kardol P, Reynolds W N, Norby R J, et al. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure[J]. Applied Soil Ecology, 2011, 47(1): 37-44
- [9] 刘继亮, 李锋瑞, 牛瑞雪, 等. 黑河中游干旱绿洲土壤盐渍化对大型土壤动物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1551-1561
Liu J L, Li F R, Niu R X, et al. Influence of soil salinization on soil animal community in an arid oasis of middle Heihe River basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1551-1561
- [10] 孙贤斌, 刘红玉, 李玉成, 等. 重金属污染对土壤动物群落结构及空间分布的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2080-2084
Sun X B, Liu H Y, Li Y C, et al. Impact of heavy metals pollution on the community structure and spatial distribution of soil animals[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(9): 2080-2084
- [11] 林恭华, 赵芳, 陈桂琛, 等. 青海湖北岸不同土地利用方式对大型土壤动物群落的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 180-186
Lin G H, Zhao F, Chen G C, et al. Effects of different land-use types on larger-size soil animal communities in the northern region of Qinghai Lake[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 180-186
- [12] 吴玉红, 蔡青年, 林超文, 等. 四川紫色土丘陵区不同土地利用方式下中型土壤动物群落结构[J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 277-282
Wu Y H, Cai Q N, Lin C W, et al. Community structure of soil mesofauna under different land use patterns in purple soil hilly area of Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 277-282
- [13] 朱强根. 黄淮海平原土壤节肢动物对耕作和施肥的响应[D]. 南京: 南京林业大学, 2010
Zhu Q G. The effect of tillage regime and fertilization management on soil arthropod community in Huang Huai-Hai Plain, China[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010
- [14] Scheu S, Schulz E. Secondary succession, soil formation and development of a diverse community of oribatids and saprophagous soil macro-invertebrates[J]. Biodiversity and Conservation, 1996, 5(2): 235-250
- [15] Parrent J L, Morris W F, Vilgalys R. CO₂-enrichment and nutrient availability alter ectomycorrhizal fungal communities[J]. Ecology, 2006, 87(9): 2278-2287
- [16] 张志丹, 董炜华, 魏健, 等. 土壤动物学研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(29): 242-246
Zhang Z D, Dong W H, Wei J, et al. Research progresses of soil fauna[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(29): 242-246
- [17] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 等. 保护性耕作对农田碳效应影

- 响研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4275-4281
- Zhang H L, Sun G F, Chen J K, et al. Advances in research on effects of conservation tillage on soil carbon[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(12): 4275-4281
- [18] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- Yin W Y. Pictorial keys to soil animal of China[M]. Beijing: Science Press, 1998
- [19] 吴鹏飞, 刘兴良, 刘世荣. 米亚罗林区冬季大型土壤动物空间分布特征[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 659-664
- Wu P F, Liu X L, Liu S R. Spatial distributions of soil macrofauna in winter in Miyaluo forest area northwestern Sichuan, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 659-664
- [20] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413(6856): 622-625
- [21] Simmons J A, Fernandez I J, Briggs R D, et al. Forest floor carbon pools and fluxes along a regional climate gradient in Maine, USA[J]. Forest Ecology and Management, 1996, 84(1/3): 81-95
- [22] 骆亦其, 周旭辉, 姜丽芬. 土壤呼吸与环境[M]. 北京: 高教出版社, 2007: 9-10, 37
- Luo Y Q, Zhou X H, Jiang L F. Soil respiration and environment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 9-10, 37
- [23] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6366-6376
- Yan J X, Qin Z D, Zhang Y H, et al. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6366-6376
- [24] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 469-476
- Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(5): 469-476
- [25] 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
- [26] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883-2887
- Zhang Q Z, Wu W L, Wang M X, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2883-2887
- [27] 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
- [28] 管建慧. 玉米根系生长发育特性及与地上部关系的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007
- Guan J H. Study on characteristics of root system growth and relationship between root and upland parts of maize[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007
- [29] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 农田生态系统土壤 CO₂ 释放研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1-7
- Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, et al. Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2004, 32(12): 1-7
- [30] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO₂ 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 485-494
- Zheng J F, Zhang X H, Pan G X, et al. Diurnal variation of soil basal respiration and CO₂ emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilizations[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4): 485-494
- [31] 朱咏莉, 吴金水, 董成立, 等. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1040-1044
- Zhu Y L, Wu J S, Tong C L, et al. Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field[J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 1040-1044
- [32] 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[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 14-20
- Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 14-20
- [33] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764
- Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(6): 758-764
- [34] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪. 长期施肥潮土土壤呼吸的温度和水分效应[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 693-698
- Meng L, Ding W X, Cai Z C. The effect of temperature and water on soil respiration in long-term fertilized fluvo-aquic soil[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 693-698
- [35] 周萍, 刘国彬, 薛慧. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 184-193
- Zhou P, Liu G B, Xue S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(2): 184-193
- [36] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(7): 961-968
- [37] Smith V R. Moisture, carbon and inorganic nutrient controls of soil respiration at a sub-Antarctic island[J]. Soil Boil and Biochemistry, 2005, 37(1): 81-91
- [38] 梁晶, 方海兰, 郝冠军, 等. 上海城市绿地不同植物群落土壤呼吸及因子分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(1): 22-31
- Liang J, Fang H L, Hao G J, et al. Soil respiration for different plant communities in an urban green-belt of Shanghai[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(1): 22-31