

DOI: 10.5846/stxb201302010211

张赛,王龙昌,周航飞,罗海秀,张晓雨,马仲炼.西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素.生态学报,2014,34(21):6244-6255.

Zhang S, Wang L C, Zhou H F, Luo H X, Zhang X Y, Ma Z L. Analysis of soil respiration and influencing factors in maize farmland under different tillage patterns in hilly area in Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6244-6255.

西南丘陵区不同耕作模式下玉米田 土壤呼吸及影响因素

张 赛,王龙昌*,周航飞,罗海秀,张晓雨,马仲炼

(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:为了探讨不同耕作模式对旱作农田土壤呼吸的影响,采用 LI6400-09 在重庆北碚西南大学实验农场对平作(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/大豆套作体系中玉米生长季节的土壤呼吸及其水热生物因子进行了测定和分析。结果表明,玉米整个生育期阶段农田土壤呼吸先增强后减弱,变化范围为 $1.011\text{—}5.575\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$,不同处理土壤呼吸速率差异显著,表现为 $\text{RSD} > \text{TSD} > \text{TS} > \text{RS} > \text{T} > \text{R}$ 。垄作降低了玉米农田土壤呼吸速率,秸秆覆盖提高土壤呼吸速率。10 cm 土层的土壤温度表现为 $\text{R} > \text{T} > \text{RSD} > \text{TSD} > \text{RS} > \text{TS}$,土壤呼吸的土温敏感指标 Q_{10} 值排序为 $\text{TS} > \text{TSD} > \text{RS} = \text{R} > \text{T} > \text{RSD}$ 。5 cm 土层的土壤含水量高低排序为 $\text{TSD} > \text{TS} > \text{RS} > \text{RSD} > \text{R} > \text{T}$ 。土壤呼吸的土壤水分响应阈值大小排序依次为 $\text{R} < \text{T} < \text{RS} < \text{RSD} < \text{TS} < \text{TSD}$,介于 11.98%—13.11%。其中垄作下的响应阈值较低,秸秆覆盖的作用提高了土壤水分的响应阈值。干漏斗法捕获的土壤动物在玉米农田生态系统中优势类群有弹尾目、螨目和双翅目。单纯的垄作减少了土壤动物数量,秸秆覆盖下土壤动物数量明显增多,土壤动物多样性指数较高;陷阱法捕获的土壤动物与土壤呼吸存在正相关关系,地表活动的土壤动物越多,土壤呼吸作用就越强,其中 R 的相关系数最高, $r = 1.000$, $P = 0.017$, TS 的相关系数 $r = 0.915$, $P = 0.029$,而传统耕作下土壤动物数量与土壤呼吸没有明显的关系。玉米田整个生长季均表现为碳汇,净碳汇为 $679.244\text{—}723.764\ \text{g(C)}/\text{m}^2$ 。与对照相比,垄作和秸秆覆盖有利于农田生态系统的碳汇,增汇达 2.91%—6.55%。

关键词:西南丘陵区;耕作模式;玉米田;土壤呼吸;土壤温度;土壤湿度;土壤动物

Analysis of soil respiration and influencing factors in maize farmland under different tillage patterns in hilly area in Southwest China

ZHANG Sai, WANG Longchang*, ZHOU Hangfei, LUO Haixiu, ZHANG Xiaoyu, MA Zhonglian

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

Abstract: In order to investigate the effects of different tillage patterns on soil respiration in dry cropping farmland in purple hilly region in southwest China, the LI6400-09 respiratory chamber was adopted in the experiment conducted in the experimental field in Southwest University in Beibei District of Chongqing. The soil respiration rate and the soil hydrothermal and biotic factors were measured during the growth period of maize in the triple intercropping system of wheat/maize/soybean. There were six treatments including T (traditional tillage), R (ridge tillage), TS (traditional tillage + straw mulching), RS (ridge tillage + straw mulching), TSD (traditional tillage + straw mulching + decomposing inoculants), and RSD (ridge tillage + straw mulching + decomposing inoculants), which were replicated for three times. The results

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

收稿日期:2013-02-01; **网络出版日期:**2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanglec2003@163.com

indicated that the soil respiration rate was firstly increased and then decreased during the whole growth period of maize, with the variation range of $1.011\text{--}5.575\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. There were significant differences of soil respiration rate among different treatments, which could be ranked as $\text{RSD} > \text{TSD} > \text{TS} > \text{RS} > \text{T} > \text{R}$. Ridge tillage reduced soil respiration in maize farmland, whereas straw mulching treatment was opposite. The treatment of straw mulching added with decomposing inoculants resulted in the highest soil respiration rate because of the high activity of microbial. The soil temperature in 10 cm layer was ranked as $\text{R} > \text{T} > \text{RSD} > \text{TSD} > \text{RS} > \text{TS}$. It was higher under ridge tillage than under straw mulching, while that under the treatment of straw mulching added with decomposing inoculants was in between the two above. The sensitive indicator of soil temperature (Q_{10}) was ranked as $\text{TS} > \text{TSD} > \text{RS} = \text{R} > \text{T} > \text{RSD}$. Ridge tillage and straw mulching treatments enhanced the sensitivity of soil temperature, but the influence of adding decomposing inoculants was uncertain. A high Q_{10} meant that the decrease of soil temperature would lead to a big reduction in soil respiration. The straw mulching treatment could lower soil temperature and thus helped to reduce emissions of carbon dioxide. The soil moisture in 5 cm layer was ranked as $\text{TSD} > \text{TS} > \text{RS} > \text{RSD} > \text{R} > \text{T}$. The response threshold of soil moisture was sorted as $\text{R} < \text{T} < \text{RS} < \text{RSD} < \text{TS} < \text{TSD}$, which varied within 11.98%—13.11%. The response threshold was improved by straw mulching but it was relatively low under ridge tillage. In a sense, under the condition of certain soil moisture, the soil respiration would be inhibited prematurely under ridge tillage. The dominant groups of soil animals in maize field were *Collembola*, *Acarina* and *Diptera*. Compared to the control, ridge tillage reduced the number of soil animals, but straw mulching increased it and improved the index of soil animal diversity. This indicated that soil tillage patterns had great impact on soil animals. Soil respiration was only related with the animals above soil surface. The more was the amount of animals being active above soil surface, the stronger was the soil respiration. In all the treatments, the correlation coefficient of R was the highest ($r = 1.000$, $P = 0.017$), followed by TS ($r = 0.915$, $P = 0.029$). However there was no remarkable relationship between soil animals and soil respiration under traditional tillage. The farmland system showed a carbon sequestration during the whole growth period of maize and the net carbon sink was $679.244\text{--}723.764\ \text{g}(\text{C})/\text{m}^2$. Compared with the control, ridge tillage and straw mulching treatments increased carbon sequestration by as much as 2.91%—6.55%. It was concluded that conservation tillage patterns of ridge planting and straw mulching could improve the carbon sink in maize farmland ecosystem.

Key Words: hilly area in southwest China; tillage pattern; maize farmland; soil respiration; soil temperature; soil moisture; soil animal

在全球气候变化的背景下,伴随着极端天气气候事件发生频率和强度的增强,气候变化对人类社会活动带来深远的负面影响。工业革命以来的 200 年间大气二氧化碳浓度急剧上升,从 2.8×10^{-4} 增加到现在的 3.69×10^{-4} ,增加了约 32%^[1],那么如何减缓大气二氧化碳的排放成为亟待解决的全球化问题。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,占全球陆地面积的 10.5%,其中的二氧化碳排放量占人为温室气体排放量的 21%—25%。在整个陆地生态系统中,农田生态系统是最活跃的碳库,可以在最短时间内通过人为因素得以调。土壤呼吸作为农田生态系统有机碳输出的主要形式,是土壤向大气释放二氧化碳的过程,是陆地生态系统将碳素以二氧化碳形式归还给大气的主要途径,占陆地生态

系统与大气之间碳交换量的三分之二^[2]。因此深入研究农田生态系统土壤呼吸的影响机制对于全球性的固碳减排具有重要意义。

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^[3],已经有了广泛的认识。土壤呼吸与土壤温度之间存在较为明显的相关性^[4-5],土壤温度与土壤呼吸的关系通常以指数模型表示,用符号 Q_{10} 表示,即温度每增加 10 °C 土壤呼吸增加的倍数。多数学者一致认为,在土壤水分变化范围较小的情况下,土壤呼吸与土壤含水量之间没有显著的线性关系,土壤呼吸受水分变化的影响可能被其他因子或系统误差所掩盖^[6]。Li 等^[7]指出,严格意义上的土壤呼吸是指受扰动的土壤产生二氧化碳的所有代谢作用,包括 3 个生物

学过程(植物根系呼吸、土壤微生物呼吸及土壤有机质分解和土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用)。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^[8]。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^[9]。国内外陆续开展了土壤动物与全球变化之间的关系^[10-13],涉及土壤动物对土壤污染和土地利用方式的响应研究^[14-17],物种入侵、土壤干扰等多方面^[18-19]。其中土壤动物与温室气体排放结合研究较为薄弱^[20]。保护性耕作措施作为当今推广应用的一项重要的农业管理措施,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^[21]。

基于此,开展本研究,旨在通过分析保护性耕作下玉米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实验农场,29°51'N,106°27'E,海拔 244 m,属亚热带季风湿润气候,年均太阳总辐射量 87108 kJ/cm²,年均总日

照时数 1276.7 h,多年平均气温 18 ℃,≥10 ℃积温 5979.5 ℃,夏季最高气温达 40 ℃左右,无霜期达 359 d,多年平均降雨量 1133.7 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 1181.1 mm,伏旱发生频率达 93%。试验地土壤为旱地紫色土,坡度较缓,地力相对均匀。实验前按五点法取 0—20 cm 土层土样进行土壤基本理化性质分析,其中土壤容重 1.21 g/cm³,pH 值为 6.47,土壤有机质 28.00 g/kg,全氮 1.68 g/kg,全磷 1.46 g/kg,全钾 34.54 g/kg,速效磷 18.13 mg/kg,速效钾 270.23 mg/kg,碱解氮 35.23 mg/kg。

1.2 试验设计

试验地采用“小麦/玉米/大豆”三熟复种轮作模式,已经连续进行保护性耕作研究 6a,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,每个小区的面积为 8 m×3.6 m。均分四厢,每厢宽度为 1 m,长度为 3.6 m。供试作物为小麦(糯小麦品系,播种量 90 kg/hm²),玉米(西单一号,移栽密度 88933 株/hm²)和大豆(渝豆一号,播种量 115 kg/hm²)。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/hm²、尿素 152 kg/hm²,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/hm²,尿素 74 kg/hm²,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/hm²。覆盖处理所用的玉米及小麦秸秆,收获后人工截成 10 cm 左右,均匀覆盖于小区内,每小区覆盖秸秆 42.7 kg(折合 24000 kg/hm²)。

表 1 试验处理描述
Table 1 Treatment descriptions

代码 Code	处理 Treatments	具体措施 Specific measures
T	平作	整个试验期传统耕作
R	垄作	在每一茬作物播种(移栽)前起垄,垄高 20 cm,作物种植在垄上
TS	平作+覆盖	整个试验期传统耕作,收获的秸秆全量就地覆盖
RS	垄作+覆盖	整个试验期起垄,收获的秸秆全量就地覆盖
TSD	平作+覆盖+秸秆速腐剂	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
RSD	垄作+覆盖+秸秆速腐剂	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

秸秆速腐剂处理中,采用由广州农冠(台资)生物科技有限公司提供的农运来堆肥专用菌种,成分为复合益菌,有效活菌数 $\geq 10^9$ cfu/g,速腐剂剂量为秸秆量的0.2%,溶于水后均匀喷洒在秸秆上。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。每个处理按照行间、株间和条带边缘 3 个不同位置选取 3 个固定点,每个点放置自制的 PVC 环,底面积 80 cm²,高 5 cm,于测定前一天安置好,插入土壤 2 cm,以减少对土壤的干扰。每个 PVC 环测定 1 次,设定 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。玉米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 09:00—11:00。

1.3.2 土壤水热因子测定

土壤温度用 LI6400-09 自带的土壤温度探针测定,深度为 10 cm。土壤水分测定是在每个样点的土壤呼吸测定同时按照五点法取 0—5 cm 土层,混匀后放入铝盒,带回实验室用烘干法测定含水量。

1.3.3 土壤动物测定

从玉米移栽前到收获后,每半个月左右按照五点法取土样带回实验室,采用“干漏斗法(tullgren apparatus)”进行分离。同时采用“陷阱法”捕获地面土壤动物,每月 1 次。土壤动物分类采用尹文英主

编的《中国土壤动物检索图鉴》^[22],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、均匀度指数、优势度指数和丰富度指数进行比较分析^[23]。

多样性指数(Shannon-Wiener): $H = -\sum (P_i \ln P_i)$

均匀度指数(Pielou): $E = H/\ln S$

优势度指数(Simpson): $C = \sum (P_i)^2$

丰富度指数(Menhinick): $D = \ln S/\ln N$

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

不同处理的土壤呼吸特征的差异性采用一维方差分析;运用相关分析方法分析土壤温度、土壤水分和土壤动物数量与土壤呼吸的关系;运用线性回归方法分析土壤呼吸速率与土壤温度、土壤水分之间的关系。所有数据处理在 SPSS13.0 和 Excel2003 表格中完成统计分析与制图。

2 结果与分析

2.1 农田土壤呼吸特征

玉米整个生育期内,土壤呼吸先增强后减弱,变化范围为 1.011—5.575 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,最小值出现在在 5 月 1 日拔节期的处理 T,最大值出现在在 6 月 14 日吐丝期处理 TSD(图 1)。不同处理土壤呼吸速率差异显著,垄作较对照处理影响了土壤呼吸的

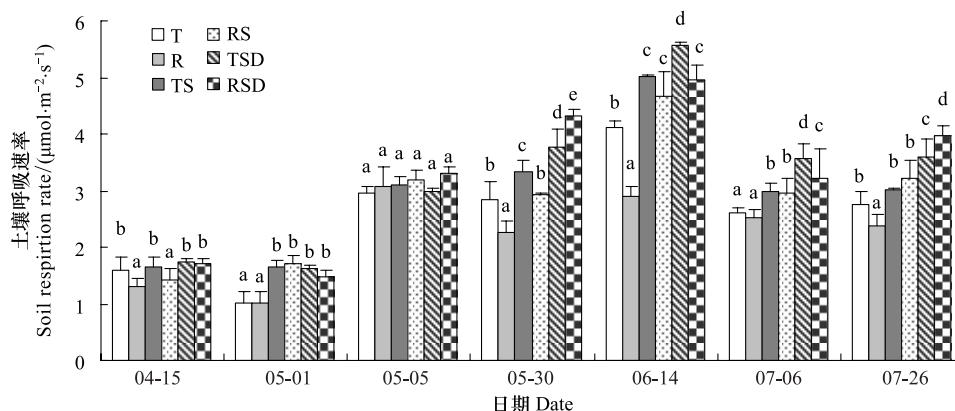


图 1 同时期不同处理之间土壤呼吸速率的比较

Fig.1 The comparison of soil respiration rate in the same time of different treatment

图中不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$)

T: 平作 Traditional farming; R: 垄作 Ridge tillage; TS: 平作+覆盖 Traditional tillage + straw mulching; RS: 垄作+覆盖 Ridge tillage + straw mulching; TSD: 平作+覆盖+秸秆速腐剂 Traditional tillage + straw mulching+ decomposing inoculants; RSD: 垄作+覆盖+秸秆速腐剂 Ridge tillage + straw mulching+ decomposing inoculants

-3.71%—29.41%,除5月1日和5月15日两次测定中垄作下土壤呼吸略高于对照,其余时间垄作均降低了土壤呼吸速率。秸秆覆盖较对照提高了土壤呼吸的4.31%—68.73%。不考虑秸秆的交互作用,速腐剂的添加对土壤呼吸的影响-4.00%—20.04%。在玉米农田垄作有明显的降低土壤呼吸的作用,而秸秆覆盖提高了土壤呼吸作用。

同一处理在不同时期土壤呼吸速率差异较大(图2),在玉米生长前期土壤呼吸较弱,差异不显著,但是从5月15日开始,小麦收获后玉米进入快

速生长期,土壤呼吸作用明显增强。6个处理的土壤呼吸在快速增强后一段时间内稳定波动,变幅不大,直到玉米结束营养生长开始生殖生长土壤呼吸达到最大,之后随着玉米进入成熟阶段土壤呼吸作用开始降低。在玉米生长的115d内(4月4日移栽,7月27日收获),T、R、TS、RS、TSD和RSD6个处理的日均土壤呼吸分别为2.555、2.208、2.959、2.869、3.261和3.277 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,大小排序为RSD>TSD>TS>RS>T>R。

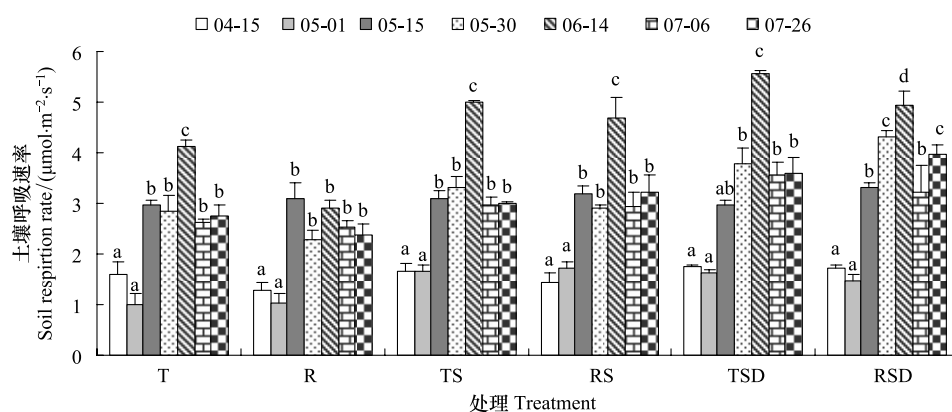


图2 同处理不同时间段的土壤呼吸速率的比较

Fig.2 The comparison of soil respiration rate in the same treatment of different time

图中不同小写字母表示不同时期差异达到显著水平($P<0.05$)

2.2 土壤水热因子与土壤呼吸的关系

玉米整个生长季节大气温度、气室温度和土壤温度持续上升,各处理土壤温度大小排序为R>T>RSD>TSD>RS>TS。秸秆覆盖降低了土壤温度,添加

速腐剂后土壤温度略有升高,但是仍然低于没有秸秆覆盖的处理。这种差异在高温下表现得更加明显,气温过高时秸秆覆盖能有效地降低土壤温度,避免作物遭受高温危害(图3)。

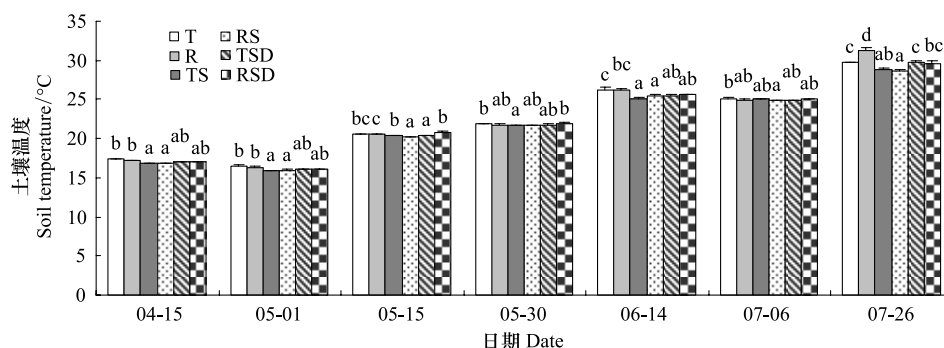


图3 玉米生长季不同处理之间的土壤温度

Fig.3 The soil temperature between different treatment in maize growth season

图中不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$)

以往的研究表明,土壤温度与土壤呼吸的关系

常采用 Q_{10} 值表示,即温度每增加10℃土壤呼吸增

加的倍数,是呼吸速率对温度变化的敏感性指标,通常为 1.3—5.6^[24]。计算公式^[21]为:

$$Y = a \times e^{bx}, Q_{10} = e^{10b}$$

式中, Y 为土壤呼吸速率($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$),即每平方米土壤每天排放的二氧化碳含碳量, x 为土壤温度($^{\circ}\text{C}$), a 和 b 为模拟计算值。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下表 2。结果显示 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 土壤呼吸速率与土壤温度的关系方程

Table 2 Relation equation of soil respiration rate and soil temperature

处理 Treatments	a	b	n	R^2	P	土壤呼吸的土温 敏感系数 Q_{10} The temperature sensitive indicator of soil respiration
平作 T Traditional tillage	0.344	0.085	20	0.512	0.000	2.34
垄作 R Ridge tillage	0.357	0.083	20	0.429	0.002	2.41
平作+覆盖 TS Traditional tillage + straw mulching	0.279	0.099	20	0.461	0.001	2.69
垄作+覆盖 RS Ridge tillage + straw mulching	0.407	0.083	20	0.405	0.003	2.41
平作+覆盖+秸秆速腐剂 TSD Traditional tillage + straw mulching+ decomposing inoculants	0.340	0.093	20	0.537	0.000	2.53
垄作+覆盖+秸秆速腐剂 RSD Ridge tillage + straw mulching+ decomposing inoculants	0.451	0.081	20	0.289	0.014	2.25

土壤水分除 4 月 15 日较低外其余时间变化平缓。各处理土壤水分差异显著,大小排序为 TSD>TS>RS>RSD>R>T,小麦收获(5 月 11 日)后对应处理覆盖了新鲜的小麦秸秆,显著性增强。土壤含水量与土壤呼吸的关系较为复杂,目前还没有统一的定论。但是有相关的研究表明,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^[25]。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了二次函数模拟,结果表明各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 0.748($P=0.064$)、0.781($P=0.048$)、0.559($P=0.194$)、0.811($P=0.036$)、0.603($P=0.158$)、0.951($P=0.002$)。在一定的土壤水分范围内,土壤呼吸随着土壤水分增加而增强,当超过某一点时土壤呼吸随土壤水分的持续增加而受到抑制,我们把导致土壤呼吸受到抑制的土壤水分值作为土壤呼吸的土壤水分响应阈值。通过计算各处理所拟合的抛物线顶点坐标,得出各处理土壤呼吸的土壤水分响

应阈值大小排序为 $R<T<RS<RSD<TS<TSD$,介于 11.98%—13.11%。其中垄作下的响应阈值较低,从某种意义上来说在同一土壤湿度下垄作处理的土壤呼吸将会过早的受到抑制,从而减少二氧化碳的排放。相反的,秸秆覆盖的作用提高了土壤水分的响应阈值。

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总共 3111 个,种类 15 种。其中弹尾目、螨目和双翅目(RS 除外)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)。与对照相比,垄作减少了土壤动物数量,秸秆覆盖和垄作与秸秆覆盖的交互作用均有助于土壤动物的数量,说明耕作模式对土壤动物的数量影响较大。

除垄作外,TS、RS 均不同程度提高了农田土壤动物多样性指数,因此秸秆覆盖保护性措施有利于土壤动物多样性指数的提高(表 4),并将进一步提高整个农田生态系统的稳定性。

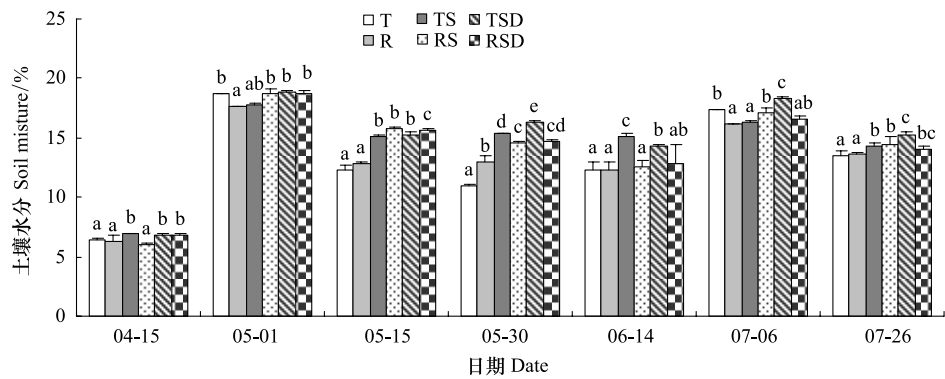


图 4 玉米生长季不同处理之间的土壤水分

Fig.4 The soil moisture between different treatment in maize growth season

图中不同小写字母表示不同处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)

表 3 土壤动物数量与比例

Table 3 Number of soil animals and proportion

动物种类 Soil animals species	平作 T(CK) Traditional tillage		垄作 R Ridge tillage		平作+覆盖 TS Traditional tillage + straw mulching		垄作+覆盖 RS Ridge tillage + straw mulching	
	数量/个 Number	比例/% Proportion	数量/个 Number	比例/% Proportion	数量/个 Number	比例/% Proportion	数量/个 Number	比例/% Proportion
弹尾目 Elastic tail	394	64.80	368	65.95	490	55.30	752	71.01
螨目 Acarina	118	19.41	95	17.03	187	21.11	168	15.86
双翅目 Diptera	70	11.51	57	10.22	90	10.16	66	6.23
鞘翅目 Coleopteran	5	0.82	8	1.43	16	1.81	12	1.13
缨翅目 Thysanoptera	1	0.16	0	0.00	0	0.00	0	0.00
蜘蛛目 Araneae	4	0.66	4	0.72	8	0.90	3	0.28
膜翅目 Hymenoptera	1	0.16	8	1.43	3	0.34	2	0.19
蜈蚣目 Scolopendromorpha	2	0.33	3	0.54	4	0.45	9	0.85
线蚓科 Enchytraeidae	11	1.81	4	0.72	20	2.26	30	2.83
单向蚓目 Unidirectional mesh earthworm	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	0.19
盲蛛 Blind spider	1	0.16	1	0.18	1	0.11	1	0.09
唇足纲 Chilopoda Gang	1	0.16	7	1.25	7	0.79	1	0.09
等足目 Isopoda	0	0.00	0	0.00	2	0.23	4	0.38
直翅目 Orthoptera	0	0.00	3	0.54	4	0.45	8	0.76
蜗牛 Snail	0	0.00	0	0.00	4	0.45	0	0.00
合计 Total	608	100.00	558	100.00	886	100.00	1059	100.00

表 4 土壤动物多样性指数比较

Table 4 Comparison of soil animals diversity index

多样性指数 Diversity index	平作 T(CK) Traditional tillage	垄作 R Ridge tillage	平作+覆盖 TS Traditional tillage + straw mulching	垄作+覆盖 RS Ridge tillage + straw mulching
Shannon-Wiener <i>H</i>	1.054	1.012	1.216	1.124
Pielou <i>E</i>	0.440	0.394	0.474	0.469
Simpson <i>C</i>	0.471	0.534	0.362	0.476
Menhinick <i>D</i>	0.374	0.344	0.353	0.379

从每次调查的土壤动物数量分析(图5),第2次和第3次土壤动物数量较少是由于玉米移栽和埋土等人类活动造成的。最后一次取样 T、R 两个处理土壤动物数量急剧减少,明显少于 TS、RS 两个处理。究其原因是因为7月底玉米收获后,TS、RS 两个处理又添加了玉米秸秆,补充了土壤动物的食物。由此可见,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的处理,但是陷阱法捕获的土壤动物没有表现出一致的现象(图6)。说明秸秆覆盖虽然增加了土壤动物的食物来源,但是由于空间阻碍影响了地表土壤动物的活动,相比而言无秸秆覆盖的处理中地表的土壤动物活动更加频繁。

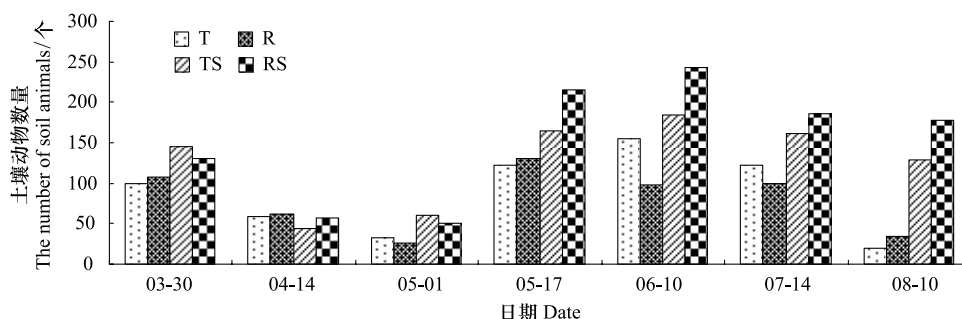


图5 干漏斗法捕获的土壤动物数量

Fig.5 Number of soil animals by tullgren apparatus

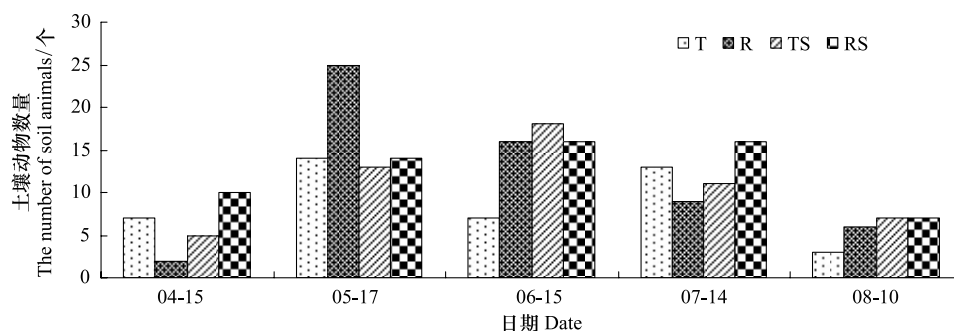


图6 陷阱法捕获的土壤动物数量

Fig.6 Number of soil animals by pitfall traps method

土壤动物与土壤呼吸相关分析的结果表明,干漏斗法捕获的土壤动物数量与土壤呼吸相关性不显著,但是陷阱法捕获的土壤动物数量与土壤呼吸存在显著的相关关系,其中 R 相关系数最高, $r=1.000$, $P=0.017$,TS 相关系数 $r=0.915$, $P=0.029$,其他处理两者之间的相关性不强。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 RS 相关系数达到了显著水平, $r=0.930$, $P=0.022$ 。研究结果表明,在垄作、秸秆堵盖条件下,土壤呼吸与活动在地表的土壤动物存在正相关关系,即地表活动的土壤动物越多,土壤呼吸作用就越强;而传统耕作下土壤动物数量与土壤呼吸没有明显的关系。

2.4 玉米农田生态系统碳源汇特征

为了初步估算玉米农田生态系统碳源汇特征,需要对土壤呼吸进行区分,将自养呼吸和异养呼吸占土壤总呼吸的比例进行量化。有学者测定玉米生长季中根系呼吸占土壤总呼吸的 43.1%—63.6%^[26],为了简化计算,本研究设定玉米根系呼吸占总呼吸的 50%,根冠比为 0.1,植株碳含量 40%。从表 5 中可以看出,不同处理下农田在玉米生长季均为碳汇,以垄作和秸秆覆盖为主的保护性耕作有利于增强农田碳汇功能,增强幅度为 2.91%—6.55%。

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^[27]。上文分析可以看出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,他们三者之间不是简单的线性关系,单一因子模型无法全面的解释土壤呼吸,需要建立各因素耦合关系模型才能更加科学合理的解释土壤呼吸^[28]。

表 5 不同处理农田生态系统净碳汇估算
Table 5 Estimation of net carbon storage in farmland ecosystem under different treatments

处理 Treatments	碳固定/(g(C)/m ²) Carbon sinks			碳排放/(g(C)/m ²) Carbon sources		净碳汇/ (g(C)/m ²) Net carbon storage	增汇幅度/% Sinks amplitude
	地上部分 Above ground	地下部分 Under ground	合计 Total	总土壤呼吸 Total soil respiration	异养呼吸 Heterotrophic respiration		
平作 T Traditional tillage	755.966	75.597	831.563	304.638	152.319	679.244	-
垄作 R Ridge tillage	755.130	75.513	830.643	263.264	131.632	699.011	2.91
平作+覆盖 TS Traditional tillage + straw mulching	817.656	81.766	899.422	352.806	176.404	723.018	6.44
垄作+覆盖 RS Ridge tillage + straw mulching	794.389	79.439	873.828	342.077	171.038	702.790	3.47
平作+覆盖+ 秸秆速腐剂 TSD Traditional tillage + straw mulching+ decomposing inoculants	823.867	82.387	906.253	388.816	194.408	711.846	4.80
垄作+覆盖+ 秸秆速腐剂 RSD Ridge tillage + straw mulching+ decomposing inoculants	835.569	83.557	919.126	390.723	195.362	723.764	6.55

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。秸秆覆盖处理在不同作物中对土壤呼吸的影响趋势一致,均在不同程度的增强了土壤呼吸,且随着秸秆分解后期对土壤呼吸的影响逐渐减弱。这跟以往的研究结论一致,一般认为秸秆还田会促进土壤中二氧化碳的释放^[29]。官情等^[30]在黄土旱塬区观测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^[31]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^[32]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。本研究得出玉米生育期内垄作降低土壤呼吸速率最高可达 29.41%,秸秆覆盖较对照提高了土壤呼吸的 4.31%—68.73%。玉米农田垄作降低土壤呼吸的作用,而秸秆覆盖提高土壤呼吸作用。秸秆覆盖提高土壤呼吸是因为秸秆增加土壤有机质含量,土壤微生物增多,促进作物根系的生长发育,而根系呼吸和土壤微生物呼吸是土壤呼吸的主要形式。垄作降低土壤呼吸可能是因为土壤温度和土壤水分的改变导致。

3.2 土壤水热因子对土壤呼吸的影响

土壤温度和土壤水分是对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^[33-35]。其中采用指数模型最普遍,利用 Q_{10} 指数模型能够很好的反应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 $R>T>RSD>TSD>RS>TS$,秸秆覆盖措施降低了土壤温度,同时也有助于二氧化碳的减排。

土壤水分是土壤重要的物理性质,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^[36-38],本研究中模拟的 5 cm 土壤水分与土壤呼吸表现为抛物线函数,其中 R、RS、RSD 曲线拟合达到显著水平,通过计算各处理土壤呼吸的土壤水分响应阈值 $R<T<RS<RSD<TS<TSD$,介于 11.98%—13.11%。其中垄作下的响应阈值较低,秸秆覆盖的高,因此从某种意义上来说在同一土壤湿度下垄作处理的土壤呼吸将会过早的受到抑制,从而减少二氧化碳的排放。

3.3 土壤动物对土壤呼吸的影响

土壤动物在生态系统中是重要的物质分解者,对改变土壤性质、物质迁移和能量转化具有重要的作用。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。本研究中土壤动物与土壤呼吸相关分析的结果表明只有在陷阱法下的土壤动物数量与土壤呼吸存在显著的相关关系,其中 R 相关系数最高, $r=1.000$, $P=0.017$, TS 相关系数 $r=0.915$, $P=0.029$ 。T 和 RS 两个处理二者的相关性不强,可能是由于传统耕作下土壤动物少,土壤呼吸主要受土壤温度和水分的影 响;单纯的垄作和秸秆覆盖下土壤呼吸与土壤动物数量高度相关,垄作和秸秆处理交互作用则降低了土壤动物与土壤呼吸的相关性。将同一时期两种方法捕获的土壤动物总数相加,再与土壤呼吸进行相关分析,发现 RS 相关系数达到了显著水平, $r=0.930$, $P=0.022$,说明在研究垄作和秸秆覆盖的交互作用下土壤呼吸的影响

因素时,需要扩大土壤动物的研究范围,才能更明确的反映土壤呼吸与土壤动物的关系。由于两种方式捕获的土壤动物在大小和种类都有很大区别,干漏斗法主要搜集到体型在 2 mm 以下的中小型土壤动物,陷阱法捕获的大多是活动在地表的弹跳力不强的土壤动物。因此本研究所得的土壤动物并没有囊括土壤中的所有动物,所以土壤动物与土壤呼吸的相关性较差,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。同时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,还包括土壤根系呼吸、土壤异养呼吸和土壤有机质分解等过程。

今后开展土壤呼吸的水热生物复合因子耦合关系的研究意义重大,从而明确土壤呼吸的影响机理,为土壤固碳减排提供科学依据。

4 结论

(1) 玉米整个生育期阶段农田土壤呼吸先增强后减弱,变化范围为 $1.011—5.575 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,不同处理土壤呼吸速率差异显著,表现为 $RSD>TSD>TS>RS>T>R$,垄作降低了玉米农田土壤呼吸作用,秸秆覆盖提高土壤呼吸速率。

(2) 各处理 10 cm 土层的土壤温度表现为 $R>T>RSD>TSD>RS>TS$,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。

(3) 5 cm 土层的土壤含水量高低排序为 $TSD>TS>RS>RSD>R>T$ 。本研究中土壤呼吸的土壤水分响应阈值依次为 $R<T<RS<RSD<TS<TSD$,介于 11.98%—13.11%。其中垄作下的响应阈值较低,秸秆覆盖的作用提高了土壤水分的响应阈值。

(4) 土壤动物在土壤呼吸中的作用不容忽视。在玉米农田生态系统中优势类群有弹尾目、螨目和双翅目。垄作减少了土壤动物数量,秸秆覆盖有助于土壤动物数量的增加和土壤动物多样性的提高。地表活动的土壤动物越多,土壤呼吸作用就越强,其中 R 的相关系数最高, $r=1.000$, $P=0.017$, TS 的相关系数 $r=0.915$, $P=0.029$ 。本研究中,在垄作、秸秆覆盖条件下土壤呼吸仅与活动在地表的土壤动物数量存在一定的关系;而传统耕作下土壤动物数量与土

壤呼吸没有明显的关系。

(5) 玉米农田土壤呼吸总量为 263.264—390.723 g(C)/m², 作物固定碳量 830.643—919.126 g(C)/m², 整个生长季均表现为碳汇, 净碳汇为 679.244—723.764 g(C)/m²。与对照相比, 垄作和秸秆覆盖有利于农田生态系统的碳汇, 增汇达 2.91%—6.55%。

References:

- [1] Chen P Q. Carbon Cycle of Earth System. Beijing: Science Press, 2004: 21-21.
- [2] Wang Y Q, Cui F J, Guo X G. Farmland ecosystem soil respiration literature review. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2010, (3): 65-67.
- [3] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 719-733.
- [4] Liu S, Yan C R, He W Q, Liu Q. Soil respiration and it's affected factors under different tillage systems in dryland production systems. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2919-2914.
- [5] Dai K, Cai D X, Wang Y, Zhao Q S, Zhang D C, Feng Z H, Zhang X M, Wang X B. Effects of different tillage on soil respiration rate of spring corn in the dryland of north China-effects of soil temperature on soil respiration rate. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010, (6): 64-69.
- [6] Chen Q S, Li L H, Han X G, Yan Z D. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972-978.
- [7] Li Y N, Wang G Y, Li W. Soil respiration and carbon cycle. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 351-357
- [8] Song L H, Wu H T, Wu D H. Soil fauna ecology in China cropland ecosystems: Research progress. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(12): 2898-2906.
- [9] Wang Y, Wei W, Yang X Z, Chen D L, Yang L. Interrelationships between soil fauna and soil environmental factors in China: Research advance. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2441-2448.
- [10] Bokhorst S, Huiskes A, Convey P, van Bodegom P M, Aerts R. Climate change effects on soil arthropod communities from the Falkland Islands and the Maritime Antarctic. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(7): 1547-1556.
- [11] Convey P, Pugh P J A, Jackson C, Murray A W, Ruhland C T, Xiong F S, Day T A. Response of antarctic terrestrial microarthropods to long-term climate manipulations. Ecology, 2002, 83(11): 3130-3140.
- [12] Kardol P, Reynolds W N, Norby R J, Classen A T. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure. Applied Soil Ecology, 2011, 47(1): 37-44.
- [13] Liu J L, Li F R, Niu R X, Liu C A, Liu Q J. Influence of soil salinization on soil animal community in an arid oasis of middle Heihe River basin. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1551-1561.
- [14] Sun X B, Liu H Y, Li Y C, Zhang X P. Impact of heavy metals pollution on the community structure and spatial distribution of soil animals. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(9): 2080-2084.
- [15] Lin G H, Zhao F, Chen G C, Chen S Y, Su J P, Zhang T Z. Effects of different land-use types on larger-size soil animal communities in the northern region of Qinghai Lake. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 180-186.
- [16] Wu Y H, Cai Q N, Lin C W, Zhao X, Cheng X. Community structure of soil mesofauna under different land use patterns in purple soil hilly area of Sichuan Basin. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 277-282.
- [17] Zhu Q G. The Effect of Tillage Regime and Fertilization Management on Soil Arthropod Community in Huang Huaihai Plain [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [18] Scheu S, Schulz E. Secondary succession, soil formation and development of a diverse community of oribatids and saprophagous soil macro-invertebrates. Biodiversity and Conservation, 1996, 5(2): 235-250.
- [19] Parrent J L, Morris W F, Vilgalys R. CO₂-enrichment and nutrient availability alter ectomycorrhizal fungal communities. Ecology, 2006, 87(9): 2278-2287.
- [20] Zhang Z D, Dong W H, Wei J, Gai Y H. Research progresses of soil fauna. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(29): 242-246.
- [21] Zhang H L, Sun G F, Chen J K, Chen B. Advances in research on effects of conservation tillage on soil carbon. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(12): 4275-4281.
- [22] Yin W Y. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998.
- [23] Wu P F, Liu X L, Liu S R. Spatial distributions of soil macrofauna in winter in Miyaluo forest area northwestern Sichuan, China. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 659-664.
- [24] Simmons J A, Fernandez I J, Briggs R D, Delaney M T. Forest floor carbon pools and fluxes along a regional climate gradient in Maine, USA. Forest Ecology and Management, 1996, 84(1/3): 81-95.
- [25] Luo Y Q, Zhou X H// Jiang L F, Qu L Y, Zhou Y M, Wen Y X, translator. Soil Respiration and The Environment. Beijing: Higher Education Press, 2007: 9-10.
- [26] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi K Q. Spatial heterogeneity of soil respiration and contribution of root respiration in a maize (*Zea mays* L.) agriculture field. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5354-5261.
- [27] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. Nature, 2001, 413(6856): 622-625.
- [28] Yan J X, Qin Z D, Zhang Y H, Li H J. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a Pinus tabulaeformis forest. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6366-6376.
- [29] 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.
- [30] Guan Q, Wang J, Song S Y, Liu W Z. Effects of different mulching measures on winter wheat field soil respiration in Loess Plateau dry land region. Chinese Journal of Applied Ecology,

- 2011, 22(6): 1471-1476.
- [31] Zhang Q Z, Wu W L, Wang M X, Zhou Z R, Chen S F. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [32] Wang T C, Wei L, Tian Y, Ma C, Du Y Y, Tan Y. Dynamic changes of soil respiration on mulched bed planting under winter wheat and summer maize double cropping integration. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1970-1974.
- [33] Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, Liu J, Zhao L. Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2004, 32(12): 1-7.
- [34] Zheng J F, Zhang X H, Pan G X, Li L Q. Diurnal variation of soil basal respiration and CO₂ emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilizations. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 485-494.
- [35] Zhu Y L, Wu J S, Tong C L, Wang K L, Wang Q X. Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field. *Environmental Science*, 2008, 29(4): 1040-1044.
- [36] Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 14-20.
- [37] Zou J W, Huang Y, Zong L G, Zheng X H, Wang Y S. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758-764.
- [38] Meng L, Ding W X, Cai Z C. The effect of temperature and water on soil respiration in long-term fertilized Fluvo-aquic Soil. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 693-698.
- 2012, 23(6): 1551-1561.
- [14] 孙贤斌, 刘红玉, 李玉成, 张小平. 重金属污染对土壤动物群落结构及空间分布的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 2080-2084.
- [15] 林恭华, 赵芳, 陈桂琛, 陈生云, 苏建平, 张同作. 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. *草业学报*, 2012, 21(2): 180-186.
- [16] 吴玉红, 蔡青年, 林超文, 赵欣, 程序. 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. *生态学杂志*, 2009, 28(2): 277-282.
- [17] 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.
- [20] 张志丹, 董伟华, 魏健, 盖玉红. 土壤动物学研究进展. *中国农学通报*, 2012, 28(29): 242-246.
- [21] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 陈阜. 保护性耕作对土壤碳效应影响研究进展. *中国农业科学*, 2009, 42(12): 4275-4281.
- [22] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [23] 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. *土壤学报*, 2011, 48(3): 659-664.
- [25] 骆亦其, 周旭辉著//蒋丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 温逸馨译. 土壤呼吸与环境. 北京: 高教出版社, 2007: 9-10.
- [26] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 杨扬, 刘景利, 史奎桥. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献. *生态学报*, 2007, 27(12): 5354-5261.
- [28] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 李洪建. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366-6376.
- [29] 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. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476.
- [30] 官情, 王俊, 宋淑亚, 刘文兆. 黄土旱原区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1471-1476.
- [31] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 周中仁, 陈淑峰. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [32] 王同朝, 卫丽, 田原, 马超, 杜园园, 谭阳. 冬小麦-夏玉米一体化垄作覆盖下农田土壤呼吸变化研究. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9): 1970-1974.
- [33] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 刘军, 赵磊. 农田生态系统土壤 CO₂ 释放研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(12): 1-7.
- [34] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 李恋卿. 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. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 485-494.
- [35] 朱咏莉, 吴金水, 童成立, 王克林, 王勤学. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征. *环境科学*, 2008, 29(4): 1040-1044.
- [36] 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.
- [37] 邹建文, 黄耀, 宗良, 郑循华, 王跃思. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 758-764.
- [38] 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. *生态环境*, 2008, 17(2): 693-698.

参考文献:

- [1] 陈泮勤. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004: 21-21.
- [2] 王永强, 崔凤娟, 郭小刚. 农田生态系统土壤呼吸文献综述. *内蒙古农业科技*, 2010, (3): 65-67.
- [3] 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. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 719-733.
- [4] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 刘勤. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素. *生态学报*, 2010, 30(11): 2919-2914.
- [5] 代快, 蔡典雄, 王燕, 赵全胜, 张丁辰, 冯宗会, 张晓明, 王小彬. 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. *中国土壤与肥料*, 2010, (6): 64-69.
- [6] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- [7] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. *地学前缘*, 2003, 9(2): 351-357.
- [8] 宋理洪, 武海涛, 吴东辉. 我国农田生态系统土壤动物生态学进展. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2898-2906.
- [9] 王移, 卫伟, 杨兴中, 陈利顶, 杨磊. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2441-2448.
- [13] 刘继亮, 李锋瑞, 牛瑞雪, 刘长安, 刘七军. 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. *应用生态学报*,