

DOI: 10. 11766/trxb201307150338

紫色土丘陵区保护性耕作下旱地土壤呼吸及影响因素*

张 赛 王龙昌[†] 张晓雨 周航飞

(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 LI6400XT 便携式光合作用测量系统自带的土壤呼吸室(6400-09)在重庆北碚西南大学试验农场对传统耕作(T, traditional farming)、垄作(R, ridge planting)、传统耕作+秸秆覆盖(TS, traditional farming + straw mulching)、垄作+秸秆覆盖(RS, ridge planting + straw mulching)、传统耕作+秸秆覆盖+秸秆速腐剂(TSD, traditional farming + straw mulching + decomposing agent)、垄作+秸秆覆盖+秸秆速腐剂(RSD, ridge planting + straw mulching + decomposing agent) 6种处理下的西南紫色土丘陵区小麦/玉米/大豆套作体系中作物生长季节的土壤呼吸及其水热因子进行了测定和分析。结果表明, 6种处理中土壤呼吸速率的季节变化明显, 各处理日均土壤呼吸速率差异显著。其中在小麦-大豆条带, 小麦土壤呼吸速率均值为 $1.53 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 大豆土壤呼吸速率日均值为 $4.10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 各处理日平均土壤呼吸速率大小排序为 $T < R < TS < TSD < RS < RSD$ 。在空地-玉米-空地条带, 玉米土壤呼吸日均值为 $2.56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 介于小麦和大豆土壤呼吸速率之间, 各处理日平均土壤呼吸大小排序为 $R < T < RS < TS < RSD < TSD$ 。整个套作体系土壤呼吸总量 C 为 $1543 \sim 2134 \text{ g m}^{-2}$, 表现为 $T < R < RS < TS < TSD < RSD$ 。研究结果还显示土壤温度和土壤水分是影响旱地农田土壤呼吸的主要因素, 二者分别解释了土壤呼吸季节变化的 28.9% ~ 53.7% 和 13.7% ~ 42.0%。水热因子与土壤呼吸速率的回归分析表明, 指数方程较好地模拟了土壤呼吸与 10 cm 土温的关系, 土壤呼吸的温度敏感性指标 Q_{10} 值在 2.25 ~ 2.69 之间; 而土壤呼吸与 5 cm 土壤水分的关系以抛物线型函数模拟最优。土壤呼吸对土壤水分的响应阈值为 14.94%。该研究为明确农田生态系统土壤呼吸变化规律及影响因素的控制机理提高参考, 对估算全球碳平衡、评估区域碳源汇具有重要意义。

关键词 保护性耕作; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤含水率; 关系模型**中图分类号** S154.1 **文献标识码** A

土壤呼吸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, 是土壤有机碳输出的主要形式, 是土壤与大气气体交换的主要环节。土壤呼吸碳占陆地生态系统与大气之间碳交换量的三分之二^[1]。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 并且受到强烈的人为干扰, 是全球最活跃的碳库^[2]。王小春等结合西南丘陵、山区的自然特点和社会需求提出了旱地新型高效生态节水多熟种植模式为小麦/玉米/大豆, 其核心内容是在有机集成免耕、秸秆覆盖、作物直播技术条件下, 进行连年套种轮作^[3]。随着全球气候变暖, 生态环境日益严峻, 保护性耕作与温室气体排放的关系研究逐渐成为新

的关注热点, 尤其是农田土壤呼吸的影响因子研究, 但是到目前为止得到的结论不一致^[4-8]。且旱作农田土壤呼吸及其影响因素的研究很多, 对土壤呼吸与水热影响因子之间的关系研究存在争议^[9-10]。大多学者研究了单一作物的农田土壤呼吸, 在多熟种植制度下多种作物轮作或套作体系中的农田土壤呼吸研究较少, 尤其以西南紫色土丘陵区的麦/玉/豆为研究对象还未见报道。紫色土是中国特有的土壤资源, 在西南地区有广泛分布, 集中分布在四川省和重庆市, 面积达 16 万 km^2 , 占四川和重庆耕地总面积的 68%^[11]。基于此, 本研究旨在分析长期保护性耕作下土壤呼吸特征及其与水热影响因子的关系, 为农田生态系统固碳减排提

* 国家自然科学基金项目(31271673)资助

[†] 通讯作者: 王龙昌(1964—), 男, 陕西周至人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事生态农业与可持续发展研究。E-mail: wanglc2003@163.com

作者简介: 张 赛(1987—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事生态农业与可持续发展研究。E-mail: 532875132@qq.com

收稿日期: 2013-07-15; 收到修改稿日期: 2013-11-12

供理论依据。

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°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 87 108 kJ cm⁻²,年均总日照时数 1 277 h,多年平均气温 18 °C,≥10 °C 积温 5 979 °C,夏季最高气温达 40 °C 左右,无霜期达 359 d,多年平均降雨量 1 134 mm。试验地土壤为旱地紫色土,坡度较缓,地力相对均匀。土壤容重 1.21 g cm⁻³,pH6.47,土壤有机质 28.00 g kg⁻¹,全氮 1.68 g kg⁻¹,全磷 1.46 g kg⁻¹,全钾 34.54 g kg⁻¹,碱解氮 35.23 mg kg⁻¹,速效磷 18.13 mg kg⁻¹,速效钾 270.2 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验地采用“小麦/玉米/大豆”三熟分厢复种模式,已经连续进行保护性耕作研究 6 a,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(见表 1),每个处理均为“小麦/玉米/大豆”三熟复种轮作模式,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 2 m、长 3.6 m。供试作物为小麦(糯麦一号,播种量 90 kg hm⁻²),玉米(西单一号,密度 47 602 株 hm⁻²)和 大豆(渝豆一号,播种量 115 kg 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 hm⁻²、尿素 152 kg hm⁻²(折合纯氮 70.23 kg hm⁻²、纯磷 23.84 kg 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 hm⁻²,尿素 74 kg hm⁻²(折合纯氮 55.22 kg hm⁻²、纯磷 9.77 kg hm⁻²、纯钾 12.55 kg 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 hm⁻²(折合纯氮 42 kg hm⁻²、纯磷 18.48 kg hm⁻²、纯钾 25.44 kg hm⁻²)。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,每小区共覆盖秸秆 42.7 kg(折合 24 000 kg hm⁻²),大豆秸秆收获后直接移除,不用来覆盖。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,速腐剂剂量为秸秆量的 0.2%。田间管理措施同常规。

试验于 2011 年 11 月—2012 年 10 月在西南大学教学试验农场进行。其中小麦 11 月中旬种植、5 月中旬收获;玉米 3 月下旬育苗 4 月初移栽 7 月底收获;大豆 5 月中旬种植 10 月下旬收获。3 月下旬—5 月上旬为小麦和玉米共生期;5 月中旬—7 月下旬为玉米和大豆共生期。其中大豆播种在原先种植小麦的条带,该条带被称为小麦-大豆条带,简称为 W-S 条带。玉米移栽前和收获后闲置的条带,被称为空地-玉米-空地条带,简称为 K-C-K 条带。

表 1 试验处理描述

Table 1 Treatment designing in the experiment

代码 Code	处理 Treatment	具体措施 Specific measures
T	传统耕作 Traditional farming	整个试验期传统耕作 Traditional farming throughout the experimental period
R	垄作 Ridge planting	在每一茬作物播种(移栽)前起垄,垄高 20 cm,作物种植在垄上 Before seeding (transplanting) ridges (20 cm high) were built up, and seeds or seedlings were sown or transplanted on the ridges
TS	传统耕作 + 秸秆覆盖 Traditional farming + Straw mulching	整个试验期传统耕作,收获的秸秆全量就地覆盖 Traditional tillage with crop straw left in the field as mulch
RS	垄作 + 秸秆覆盖 Ridge planting + Straw mulching	整个试验期起垄,收获的秸秆全量就地覆盖 Ridge tillage with crop straw left in the field as mulch
TSD	传统耕作 + 秸秆覆盖 + 秸秆速腐剂 Traditional farming + Straw mulching + Decomposing agent	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 with crop straw left in the field as mulch amended with straw decomposing agent
RSD	垄作 + 秸秆覆盖 + 秸秆速腐剂 Ridge planting + Straw mulching + Decomposing agent	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 with crop straw left in the field as mulch amended with straw decomposing agent

1.3 土壤呼吸测定

从小麦播种(2011年11月)到大豆收获(2012年10月),分别按照 W-S 条带和 K-C-K 条带,每隔半个月左右在上午 9:00~11:00^[12]测定土壤总呼吸(土壤自养呼吸与土壤异养呼吸的和),遇连续降雨时则适当调整测定时间。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、株间和条带边缘三个不同位置选取 3 个固定点,间距约为 1 m,每个点放自制的 PVC 环,于开始测定前一天安置好,以减少对土壤的干扰,并在整个测定过程中 PVC 环埋设位置保持不变,用于土壤呼吸的连续定期测定。在每次测定前一天检查所有 PVC 环是否有松动,及时去掉环内杂草以去除杂草对土壤呼吸的影响。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。

为了便于分析,在绘制不同作物土壤呼吸速率动态时将土壤呼吸测定的日期相应地转化为小麦、玉米、大豆各自的不同生育期,必要时删除同一个生育期里多于 1 次的测定结果。

1.4 环境因子测定

土壤温度用 LI6400-09 自带的土壤温度探针测定,深度为 10 cm。土壤水分采用烘干法,在测定土壤呼吸的同时在 PVC 环附近采集 0~5 cm 深度的土样,3 次重复。

1.5 数据分析

不同处理的土壤呼吸特征的差异性采用一维方差分析;运用相关分析和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,分别从不同处理下 W-S 条带和 K-C-K 条带选取有代表性的 10 次取样数据,综合分析土壤水热因素对土壤呼吸的影响。土壤呼吸总量估算采用严俊霞等的方法^[13],将同一时间测定的不同条带的土壤呼吸按照不同处理相加得到某时点的总土壤呼吸,然后乘以对应月份的天数,即得到该月的土壤呼吸量,再求和即得到整个生育期土壤呼吸总量。所有数据的统计分析在 SPSS13.0 软件和 EXCEL2003 进行。

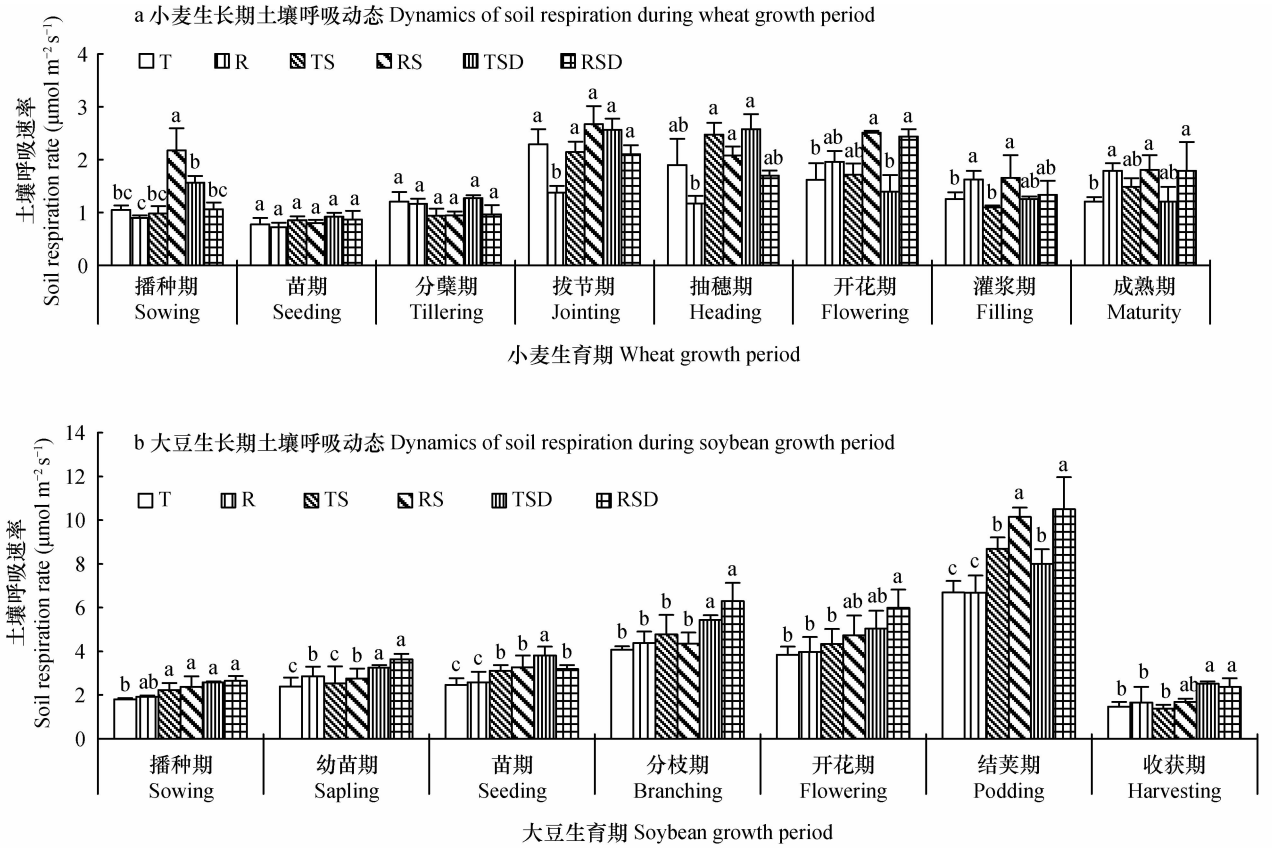
2 结果与讨论

2.1 不同作物带土壤呼吸速率的季节变化

在小麦-大豆条带,小麦生育期从 2011-11-09—2012-05-10,大豆生育期从 2012-05-15—2012-10-22。图 1a 中,小麦整个生育期土壤呼吸

变动不大,维持在 0.89~2.67 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间,平均值为 1.53 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。小麦生长初期各处理土壤呼吸速率差异不显著。从拔节期开始垄作处理的土壤呼吸速率低于传统耕作,而到了抽穗期以后则相反。秸秆覆盖处理对土壤呼吸的影响不显著,可能是由于秸秆是前茬小麦、玉米收获后覆盖的,已到分解后期,对土壤呼吸的影响不大造成。图 1b 中,大豆播种到结荚期土壤呼吸不断增强,整个生育期土壤呼吸速率波动较大,介于 1.34~10.50 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,其中分枝期之前土壤呼吸变化不大,分枝期开始土壤呼吸逐渐上升,至结荚期达到最大。收获期土壤呼吸明显降低,降低幅度高达 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导致,同时因连续下雨土壤含水量较高,在一定程度上抑制了土壤呼吸。不同处理土壤呼吸速率存在差异,大豆分枝期以前秸秆覆盖处理与传统耕作之间差异显著,进入分枝期土壤呼吸速率增强,差异逐渐变小,至结荚期差异又变得显著。其原因是大豆生长初期新添加的小麦秸秆分解较快,对土壤呼吸影响作用明显,至结荚期又新添加了玉米秸秆,因此秸秆覆盖对土壤呼吸的显著影响只在秸秆分解初期存在,这与以往的研究结论一致^[14,15]。小麦-大豆条带土壤呼吸在小麦播种期 R 处理最低,为 0.89 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,在大豆结荚期 RSD 处理土壤呼吸最高,为 10.50 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。不同处理 T、R、TS、RS、TSD、RSD 的日均土壤呼吸速率分别为 2.27、2.32、2.58、2.93、2.89、3.13 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

在空地-玉米-空地条带,图 2a 看出空地的测定时间分为两个阶段,第一阶段为 2011-11-09—2012-04-15,第二阶段为 2012-07-26—2012-10-22,玉米生育期为 2012-04-15—2012-07-26。空地第一阶段土壤呼吸速率低,不同处理的日均土壤呼吸速率分别为 0.62、0.60、1.04、0.88、0.81、0.75 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。第二阶段的土壤呼吸高,分别为 2.42、2.28、3.06、2.94、3.88、3.17 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。在第二阶段有秸秆覆盖的处理土壤呼吸均高于无秸秆覆盖,说明秸秆腐解过程影响土壤微生物的种群和数量,促进土壤呼吸作用。综合两个阶段的土壤呼吸动态,其中 T 和 R 差异不显著,RS 和 RSD 差异不显著,空地土壤呼吸在各处理间的大小排序为 T < TS < TSD。图 2b 中,玉米生育期的土壤呼吸速率在在玉米拔节期最低,为 1.01 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,随着玉米生长发育土壤呼吸逐渐增强,至吐丝期达到高峰,玉米进入营养生长阶段后土壤呼吸作



注: 不同字母表示各处理在0.05水平上差异显著。T表示传统耕作, R为垄作, TS为传统耕作+秸秆覆盖, RS为垄作+秸秆覆盖, TSD为传统耕作+秸秆覆盖+秸秆速腐剂, RSD为垄作+秸秆覆盖+秸秆速腐剂, 下同 Note: Different small letters denote significant difference between treatments at 5% probability level. T: traditional farming; R: ridge planting; TS: traditional farming +straw mulching; RS: ridge tillage+ straw mulching; TSD: traditional farming +straw mulching+decomposing agent; RSD: ridge planting+ straw mulching+ decomposing agent. The same below

图1 小麦-大豆条带土壤呼吸动态

Fig. 1 Dynamics of soil respiration in wheat-soybean strip

用开始减弱,但灌浆开始变动幅度较小。整个玉米生育期土壤呼吸变动平缓,波动范围在 1.01 ~ 5.58 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 日均土壤呼吸为 2.56、2.21、2.97、2.81、3.27、3.25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 其中 RS、TS 之间, RSD、TSD 之间差异分别不显著, 表现为 $R < T, T < TS < TSD, R < RS < RSD$ 。玉米带单纯的垄作比平作土壤呼吸作用弱, 秸秆覆盖对土壤呼吸的影响同样出现在新添加小麦秸秆后的时段。K-C-K 条带各处理日平均土壤呼吸大小排序为 $R < T < RS < TS < RSD < TSD$, 可以看出秸秆覆盖处理的土壤呼吸作用强, 秸秆速腐剂也增强了土壤呼吸, 但是传统耕作高于垄作, 不同于 W-S 条带。可能是由于玉米是高秆作物又是 C4 作物, 形成的小气候环境不同于小麦、大豆矮秆 C3 作物。

将图 1 和图 2 中同一时间测定的不同条带的土壤呼吸按照不同处理相加得到某时点的总土壤呼吸, 然后乘以对应月份的天数, 即得到该月的土壤

呼吸量, 再求和即得到整个生育期土壤呼吸总量。通过计算, 整个套作体系土壤呼吸总量为 C 1544 ~ 2135 g m^{-2} , 不同处理土壤呼吸总量表现为 $R < T < TS < RS < TSD < RSD$ 。其中小麦整个生育期土壤呼吸总量为 C 252.3 ~ 345.3 g m^{-2} , 约占总呼吸量的 16.17% ~ 16.34%。大豆整个生育期土壤呼吸总量为 C 470.6 ~ 718.3 g m^{-2} , 约占总呼吸量的 30.48% ~ 33.64%。玉米移栽开始到收获土壤呼吸总量为 C 235.8 ~ 349.0 g m^{-2} , 约占总呼吸量的 15.28% ~ 16.35%。空地呼吸总量为 C 585.0 ~ 722.4 g m^{-2} , 约占总呼吸量的 37.89% ~ 33.84%。

2.2 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

相关关系分析表明土壤呼吸与土壤温度正相关, W-S 条带 $r = 0.5426, p = 0.01$, C-K 条带 $r = 0.6291, p = 0.02$ 。本研究指数型函数曲线对 10 cm 土层土壤温度和土壤呼吸关系的拟合度最好, 即 $R_s = ae^{bT}$ 。其中 R_s 为土壤呼吸速率, T 为 10 cm 土壤

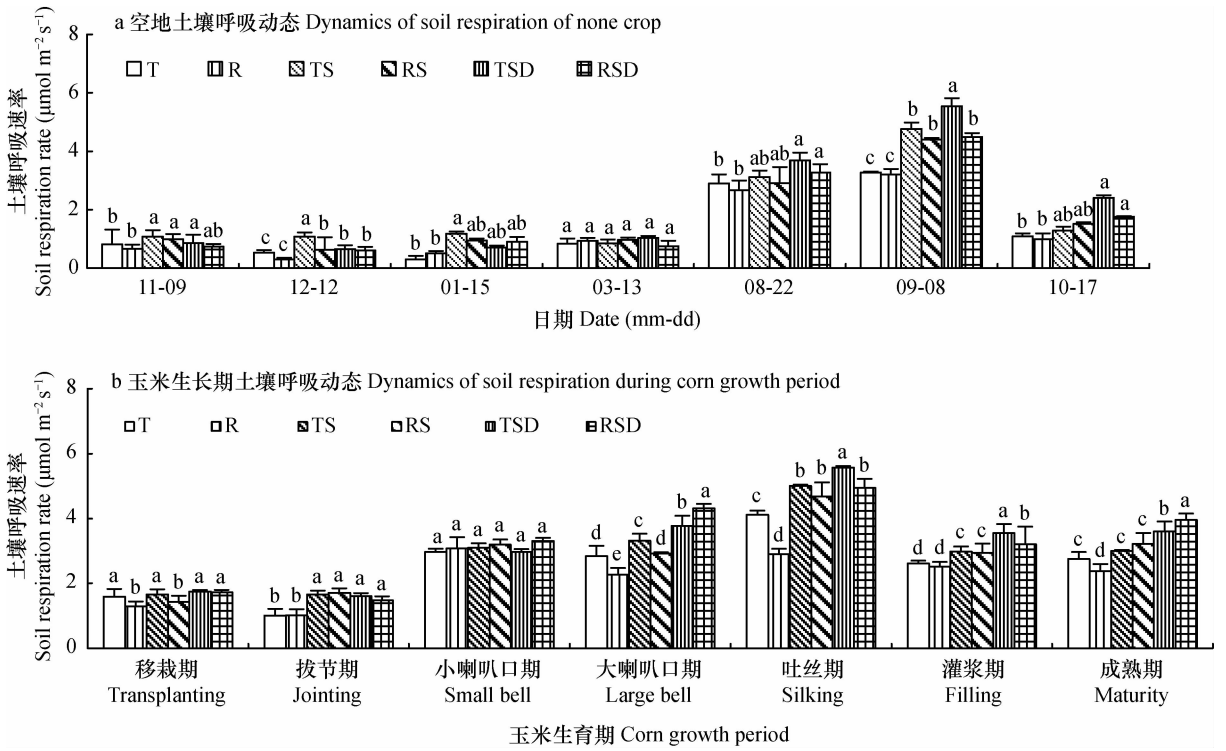


图2 空地-玉米-空地条带土壤呼吸动态

Fig. 2 Dynamics of soil respiration in vacant-corn-vacant land strip

温度, a 、 b 为待定参数。

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 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $1.3 \sim 5.6$ [16]。计算公式 [17] 为:

$Y = ae^{bx}$, $Q_{10} = e^{10b}$ 。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。

采用 $Q_{10} = e^{10b}$ 计算土壤呼吸的温度敏感性, Q_{10}

值在 $2.25 \sim 2.69$ 间变化,依次为 $\text{TS} > \text{TSD} > \text{RS} = \text{R} > \text{T} > \text{RSD}$ (见表 2)。不同处理间土壤平均温度不同,以垄作和秸秆覆盖为主的保护性耕作措施均在不同程度上提高了土壤温度。为了得到更具有物理意义的土壤呼吸与 10 cm 土层土壤温度的函数关系方程式,先以 W-S 条带土壤呼吸与土壤温度的拟合方程式作为模型,命名为“土壤温度-条带名称”即 T-WS,通过该模型预测 K-C-K 条带的土壤呼吸值,最后比较 K-C-K 条带土壤呼吸的预测值与实测

表 2 土壤呼吸速率与土壤温度的关系方程

Table 2 Relationship between soil respiration rate and soil temperature

处理代码 Treatment code	土壤平均温度 Average soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	a	b	样本数 Sample number	拟合方程 Fitting equation	R^2	p	Q_{10}
T	23.09	0.344	0.085	20	$R_s = 0.344e^{0.085T}$	0.512	0.000	2.34
R	23.13	0.357	0.083	20	$R_s = 0.357e^{0.083T}$	0.429	0.002	2.41
TS	23.20	0.279	0.099	20	$R_s = 0.279e^{0.099T}$	0.461	0.001	2.69
RS	23.10	0.407	0.083	20	$R_s = 0.407e^{0.083T}$	0.405	0.003	2.41
TSD	23.18	0.340	0.093	20	$R_s = 0.340e^{0.093T}$	0.537	0.000	2.53
RSD	23.17	0.451	0.081	20	$R_s = 0.451e^{0.081T}$	0.289	0.014	2.25
W-S	23.16	0.311	0.095	60	$R_s = 0.311e^{0.095T}$	0.465	0.000	2.59
K-K	22.98	0.350	0.088	60	$R_s = 0.350e^{0.088T}$	0.423	0.000	2.41

值来验证模型 T-WS。经分析预测值与实测值吻合度较好。但是反之,以 K-C-K 条带拟合的曲线方程作为模型 T-KCK,预测 W-S 条带土壤呼吸。预测值与实测值没有模型 T-WS 吻合度高,它低估了土壤呼吸作用。因此,选择模型 T-WS 作为土壤呼吸与土壤温度的函数关系式更具有物理意义,方程式为 $R_s = 0.311e^{0.095T}$,其中各参数值在 0.01 水平达到极显著。

研究表明在土壤湿度不成为限制因子的情况下,土壤呼吸和土壤温度之间呈现良好的相关关系^[9]。因此在分析土壤呼吸与土壤温度的关系时,根据土壤水分的测定结果,对土壤呼吸受土壤水分干旱胁迫和过湿胁迫影响的土壤呼吸数据剔除后再进行分析,剔除的标准是土壤含水率低于田间最大持水量的三分之一^[9]和高于田间最大持水量的 80%^[18]。本研究中土壤田间最大持水量为 30%,应剔除低于 10% 和高于 24% 的土壤水分值。经分析剔除后的拟合曲线 R^2 略有升高,由原来的 0.465 升高至 0.476, $p = 0.000$ 。

2.3 土壤呼吸速率与土壤水分的关系

土壤呼吸与 5 cm 土层土壤水分的相关关系分析表明两者之间负相关,其中 W-S 条带 $r = -0.3362$, $p = 0.023$, K-C-K 条带 $r = -0.1859$, $p = 0.043$ 。本研究中两者之间的关系以抛物线函数曲线的拟合度最高,即 $R_s = aw^2 + bw + c$,其中 R_s 为土壤呼吸, w 为土壤含水率, a 、 b 、 c 为待定参数(见表 3)。土壤表层含水量以垄作措施最低,秸秆覆盖则提高了土壤含水量。因为方程式的决定系数较低,且各处理均没有达到显著水平,说明土壤表层水分含量与土壤呼吸的关系较弱。但是根据函数关系式的数学意义说明土壤水分对土壤呼吸具有双向调节作用,在相对缺水状态下土壤水分的增加会促进土壤呼吸,当土壤含水率超过某个范围时,则抑制了土壤呼吸^[18]。通过对抛物线函数求导得出土壤呼吸不再随着土壤含水率增加而增加的界限值,被称为土壤呼吸对土壤含水率的响应阈值。采用模拟结果较为成功的 K-C-K 拟合方程式,得出西南地区紫色土丘陵区旱作农田土壤呼吸对土壤水分的响应阈值为 14.94%。

表 3 土壤呼吸速率与土壤水分的关系方程

Table 3 Relationship between soil respiration rate and soil moisture

处理代码 Treatment code	平均土壤含水量 Average soil moisture content(%)	a	b	c	样本数 Sample number	拟合方程 Fitting equation	R^2	p
T	15.01	-243.5	65.75	-1.2	20	$R_s = -243.5w^2 + 65.75w - 1.2$	0.288	0.056
R	13.99	-204.4	50.21	0.186	20	$R_s = -204.4w^2 + 50.21w - 0.186$	0.137	0.286
TS	15.85	-337.8	86.57	-1.589	20	$R_s = -337.8w^2 + 86.57w - 1.589$	0.279	0.062
RS	15.61	-237.9	61.47	-0.256	20	$R_s = -237.9w^2 + 61.47w - 0.256$	0.187	0.172
TSD	15.99	-263.8	75.18	-0.753	20	$R_s = -263.8w^2 + 75.18w - 0.753$	0.420	0.05
RSD	15.08	-153.8	31.44	3.558	20	$R_s = -153.8w^2 + 31.44w - 3.558$	0.159	0.386
W-S	16.18	-341.5	88.71	-1.352	60	$R_s = -341.5w^2 + 88.71w - 1.352$	0.170	0.009
K-C-K	15.31	-200.2	59.81	-1.105	60	$R_s = -200.12w^2 + 59.81w - 1.105$	0.306	0.000

野外条件下测定的土壤呼吸通常是土壤温度和土壤水分共同作用的结果,在分析它们的关系时应尽量减小另一因素的影响。其中要消除土壤温度对土壤呼吸的影响时可以先将土壤呼吸标准化到温度为 10 °C 的值,再分析土壤水分对土壤呼吸的影响^[17]。根据本研究中土壤呼吸与土壤温度的指数关系($R_s = 0.311e^{0.095T}$),得: $R_{s,10} = R_T e^{0.095(10-T)}$,其中 $R_{s,10}$ 为标准化到 10 °C 的土壤呼吸速率, R_T 为土

壤温度为 T 时的实际土壤呼吸速率, T 为实测的 10 cm 土壤温度。表 4 表明,消除土壤温度的影响后函数关系式的 R^2 反而降低了,且土壤呼吸与土壤水分不再具有显著相关性。说明影响土壤呼吸的因素复杂多样,消除土壤温度影响后还需要综合考虑土壤有机碳、氮、底物、作物生物学特性以及农业管理活动等因素^[2]。

表 4 标准化前后土壤呼吸与土壤水分的回归分析

Table 4 Regression analysis of relationship between soil respiration and soil moisture pre-and post-normalization

项目 Item	函数关系式 Function formula	R^2	p
标准化前 Pre-normalization ($n = 60$)	$R_s = -200.2w^2 + 59.81w - 1.105$	0.306	0.000
标准化后 Post-normalization ($n = 60$)	$R_s = -14.23w^2 + 3.819w + 0.581$	0.015	0.309

拟合土壤呼吸对土壤温度和土壤湿度的单因子响应模型, 仅从决定系数来比较分析精度是不够的, 必须要对模型的可靠性进行精度检验^[19]。对土壤呼吸的土壤温度和土壤湿度单因素模拟的模型进行 0.05 水平下的精度检验(表 5)。结果表明:

土壤温度与土壤呼吸的模型精度达到 70% 以上, 表现出较好的模型拟合效果, 认为具有一定的可靠性, 可以在该样地内使用。而土壤水分与土壤呼吸模型的精度不到 50%, 可靠性较差。

表 5 土壤呼吸与土壤温湿度回归模型精度检验

Table 5 Precision testing of the regression models for relationships of soil respiration with soil temperature and soil moisture

模型 Model	样本数 Sample number	标准差 Standard deviation	标准误 Standard error	T_a ($n - 2$)	绝对误差限 Absolute error limit	实测均值 Measured mean	相对误差限 Relative error limit (%)	精度 Accuracy (%)
$R_s = 0.311e^{0.095T}$	60	0.483 2	0.374	2	0.748	2.69	27.83	72.17
$R_s = -200.2w^2 + 59.81w - 1.105$	60	0.777 3	0.602	2	1.204	2.20	54.73	45.27

2.4 不同处理土壤呼吸的季节动态

在西南紫色土丘陵区麦/玉/豆复种种植制度中, 从不同作物角度看, 小麦、玉米、大豆三种作物土壤呼吸日均值分别为 1.53、2.56、4.10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。从麦/玉/豆套作体系整体出发, 总土壤呼吸表现为 $\text{RSD} > \text{TSD} > \text{TS} > \text{RS} > \text{R} > \text{T}$, 土壤呼吸总量 C 为 1.53 ~ 2.13 kg m^{-2} 。严俊霞等^[9]初步估计的玉米地年土壤呼吸总量 C 为 1.48 kg m^{-2} , 戴万宏等^[17]在陕西关中地区观测的小麦-玉米轮作农田土壤呼吸总量为传统耕作 C 为 1.35 kg m^{-2} , 秸秆还田与化肥配施提高了土壤呼吸, C 为 1.77 kg m^{-2} 。

前人已经对不同耕作的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。免耕、少耕措施能够明显降低华北平原高产农田生态系统土壤呼吸作用^[21]。而牛新胜等在河北曲周的玉米试验田证明免耕土壤呼吸速率高^[22]。代快等研究得出在高温季节免耕显著提高土壤呼吸速率, 而低温季节相反^[23]; 在高粱和大豆生育期免耕土壤呼吸高, 小麦生育期相反。因此耕作措施对土壤呼吸的影响与种植作物有关^[24]。本研究中小麦和大豆属于矮秆作物, 玉米为高秆作物, 它们所形成不同的农田小气候环境引起不同的土壤呼吸效果。王同朝等^[25]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。本研究各处理中日平均土壤呼吸在小麦-大豆条带表现为垄作处理高于传统耕作, 但是在玉米条带传统耕作又高于垄作处理。

秸秆覆盖处理在不同作物中对土壤呼吸的影响趋势一致, 均不同程度的增强了土壤呼吸, 但是这种趋势只发生在秸秆分解初期。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二氧化碳的释放^[26]。官情等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^[10]。张庆忠的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^[27]。胡正华对大豆生长期内的研究表明秸秆还田增加二氧化碳的排放总量高达 14.51%^[20]。

秸秆速腐剂对土壤呼吸的影响时间较短, 主要取决于秸秆物料的有机含量和速腐剂的剂量, 在一定程度上加速秸秆的分解, 促进微生物呼吸, 增加土壤呼吸。在小麦生育期内, 由于秸秆分解已到后期, 添加秸秆速腐剂的处理与不添加的差异不显著。而在大豆生育期内, 由于新添加了小麦秸秆,

速腐剂的添加能在一定范围增加土壤呼吸。玉米生育期内在小麦收获后处理间的差异也达到了显著水平。

2.5 土壤水热因子对土壤呼吸的影响

在许多同地域的土壤呼吸研究中,土壤呼吸与土壤温度之间存在较为明显的相关性。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^[20-30]。本研究中 10 cm 土层土壤温度与土壤呼吸以指数函数模拟效果最优,且小麦-大豆条带的模拟函数预测精度高,更具有物理意义。各处理的 Q_{10} 值在 2.25 ~ 2.69 之间,符合前人的研究,有学者综合大量文献发现 Q_{10} 值在 1.3 ~ 3.3 之间变化^[9]。本研究中传统耕作较垄作土壤呼吸的温度敏感性低,但是结合秸秆覆盖后提高了 Q_{10} 值。多数学者研究了免耕和翻耕、旋耕的 Q_{10} 值,指出免耕提高了 Q_{10} 值^[23,31]。针对垄作报道较少,本研究中垄作下的秸秆覆盖土壤呼吸温度敏感性较低,说明在温度较低时,以垄作和秸秆覆盖为主的保护性耕作能够加速降低土壤二氧化碳的排放,起到固碳减排的效果。

土壤呼吸与土壤水分的关系更加复杂,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^[32-33]。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^[34-35],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,但关系较弱。因为土壤湿度对土壤呼吸的双向调节作用,即当土壤处于相对缺水状态时,土壤水分的增加促进土壤呼吸,而当土壤水分超过某个范围时,土壤水分填充了土壤空隙,使土壤微生物缺氧阻碍了二氧化碳的排放^[36-37]。因此必然存在一个值让土壤呼吸开始受到土壤水分的抑制作用。根据抛物线函数的数学涵义,对其求导后可以得到土壤呼吸受到土壤含水率抑制的阈值,本试验地土壤呼吸对土壤水分的响应阈值为 14.94%。

由于土壤温度和土壤水分的空间多变性,有学者指出在估算土壤二氧化碳通量时宜采用根系、凋落物和土壤有机碳的碳库^[38]来描述。通常测定的土壤呼吸为土壤总呼吸,生态系统碳平衡计算一般以 NPP 与土壤异养呼吸而不是土壤总呼吸的差值作为净收支量,如何在土壤总呼吸中分离出土壤根

系呼吸、土壤异养呼吸和土壤有机质分解是亟待解决的难题,不同分离方法得到的结果相差较大^[39],因此探讨适合农田生态系统土壤总呼吸分离技术的方法是我们下一步要解决的问题。同时土壤呼吸的单因子模型存在很多局限性,预测结果存在一定的不确定性。不同学者从不同角度探讨了土壤呼吸的多因子复合模型^[17,40],其中 Akburak 和 Makineci 模拟了土壤呼吸与土壤温度、土壤水分和细根生物量三因素之间的线性关系, R^2 介于 0.223 ~ 0.562 之间^[41]。今后综合开展土壤生物物理化学因素、光合作用的底物供应对土壤呼吸的影响成为该领域的研究重点^[42],从而为准确估算农田生态系统碳收支提供科学依据。

3 结 论

以西南紫色土丘陵区小麦/玉米/大豆套作种植模式为研究对象,各作物土壤呼吸日均值小麦 < 玉米 < 大豆,3 种作物土壤呼吸量占土壤呼吸总量的比例分别为 16.17% ~ 16.34%、30.48% ~ 33.64% 和 15.28% ~ 16.35%。在不同耕作方式下,小麦-大豆条带土壤呼吸特征表现为 $T < R < TS < TSD < RS < RSD$,垄作明显提高了土壤呼吸作用。空地-玉米-空地条带土壤呼吸特征表现为 $R < T < RS < TS < RSD < TSD$ 。秸秆还田较传统耕作在一定程度上增强了土壤呼吸,但是垄作的影响效果在不同作物表现不同,在小麦-大豆条带中土壤呼吸垄作高于传统耕作,而玉米条带相反。土壤呼吸与土壤水热因子的关系模型分别以抛物线函数和指数函数最优,二者分别解释了土壤呼吸季节变化的 13.7% ~ 42.0% 和 28.9% ~ 53.7%。

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. 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 (In Chinese). 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. 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 (In Chinese). Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3):719—733
- [3] 王小春,杨文钰,雍太文. 西南丘陵旱地农作制度现状及旱地新 3 熟麦/玉/豆发展优势分析. 安徽农业科学,2009,37(9):3962—3963,3982. Wang X C, Yang W Y, Yong T W. Analysis

- on present situation trend of farming system and the development advantages of new 3 ripe wheat/maize/bean in dry land in south-west hilly region (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(9):3962—3963, 3982
- [4] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素. *生态学报*, 2010, 30(11):2919—2924. Liu S, Yan C R, He W Q, et al. Soil respiration and its affected factors under different tillage systems in dryland production systems (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11):2919—2924
- [5] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征. *应用生态学报*, 2004, 15(9):1552—1560. Chen S Y, Li J, Lu P L, et al. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9):1552—1560
- [6] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响. *土壤学报*, 2005, 42(4):584—590. Yang Y S, Chen G S, Wang X G, et al. Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese fir plantation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4):584—590
- [7] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 玉米秸秆还田对土壤呼吸速率的影响. *玉米科学*, 2011, 19(2):105—108, 113. Liu W R, Zheng J Y, Luo Y, et al. Effects of maize straw with returning into field on rate of soil respiration (In Chinese). *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(2):105—108, 113
- [8] 张宪洲, 刘允芬, 钟华平, 等. 西藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征. *资源科学*, 2003, 25(5):103—107. Zhang X Z, Liu Y F, Zhong H P, et al. Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in the tibetan plateau (In Chinese). *Resources Science*, 2003, 25(5):103—107
- [9] 严俊霞, 李洪建, 尤龙凤. 玉米农田土壤呼吸与环境因子的关系研究. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(3):183—189. Yan J X, Li H J, You L F. Studies on soil respiration and its relation with environmental factors in a maize (*Zeamays L.*) field in Taiyuan Basin (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(3):183—189
- [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. *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 (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6):1471—1476
- [11] 田秀英, 石孝均. 定位施肥对水稻产量与品质的影响. *西南大学学报:自然科学版*, 2005, 27(5):725—728, 732. Tian X Y, Shi X J. Effects of long-term fertilization at fixed location on the yield and quality of rice (In Chinese). *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science Edition*, 2005, 27(5):725—728, 732
- [12] 骆亦其. *土壤呼吸与环境*. 北京:高等教育出版社, 2007:8—9, 92. Luo Y Q. *Soil respiration and environment* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2007:8—9, 92
- [13] 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. *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 (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12):6366—6376
- [14] 张赛, 王龙昌. 秸秆还田方式对土壤呼吸和作物生长发育的影响. *西南大学学报:自然科学版*, 2013, 35(11):32—37. Zhang S, Wang L C. The influence to soil respiration and crop growth under different straw returning ways (In Chinese). *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2013, 35(11):32—37
- [15] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 水旱轮作条件下土壤有机碳的分解及土壤微生物量碳的周转特征. *江苏农业学报*, 2003, 19(1):33—36. Wang Z M, Zhu P L, Huang D M, et al. Decomposition of soil organic carbon and turnover of soil microbial biomass carbon under condition of rotation between upland crop and paddy rice (In Chinese). *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2003, 19(1):33—36
- [16] 孙小花, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(9):2173—2180. Zhang X H, Zhang R Z, Cai L Q, et al. Effects of different tillage measures on upland soil respiration in Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9):2173—2180
- [17] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 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. Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, et al. Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems (In Chinese). *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2004, 32(12):1—7
- [18] 车升国, 郭胜利, 张芳, 等. 黄土区夏闲期土壤呼吸变化特征及其影响因素. *土壤学报*, 2010, 47(6):1159—1169. Che S G, Guo S L, Zhang F, et al. Dynamics of soil respiration and its affecting factors in arid upland field during summer fallow season on the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6):1159—1169
- [19] 郑桂姿. 北带马尾松林土壤呼吸的模型模拟. 武汉:华中农业大学园艺林学学院, 2012:6. Zheng G Z. The model of soil respiration in pinus massoniana forest of northern zone (In Chinese). Wuhan: College of horticulture and forestry sciences in Huazhong Agricultural University, 2012:6
- [20] 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 等. UV-B 辐射增强与秸秆施用对大豆田土壤呼吸的影响. *环境科学*, 2010, 31(7):1638—1642. Hu Z H, Li H M, Yang Y P, et al. Influence of enhanced UV-B radiation and straw application on soil respiration in soybean field (In Chinese). *Environmental Science*, 2010, 31(7):1638—1642
- [21] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律. *环境科学学报*, 2006, 26(6):992—999. Meng F Q, Guan G H, Zhang Q Z, et al. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6):992—999
- [22] 牛新胜, 牛灵安, 张宏彦, 等. 玉米秸秆覆盖免耕对土壤呼吸

- 的影响. 生态环境, 2008, 17(1): 256—260. Niu X S, Niu L A, Zhang H Y, et al. Effect of no-tillage with maize straw mulching on soil respiration (In Chinese). Ecology and Environment, 2008, 17(1): 256—260
- [23] 代快, 蔡典雄, 王燕, 等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究—土壤温度对土壤呼吸速率的影响. 中国土壤与肥料, 2010(6): 64—69. Dai K, Cai D X, Wang Y, et al. 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 (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(6): 64—69
- [24] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution, water content, temperature, and bulk density. Applied Soil Ecology, 1995, 2: 95—109
- [25] 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. 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 (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(9): 1970—1974
- [26] Bono A, Alvarez R, Buschiazio D E, et al. Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystem. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 1140—1149
- [27] 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. 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 (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2883—2887
- [28] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 等. 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. Zhang H L, Sun G F, Chen J K, et al. Advances in research on effects of conservation tillage on soil carbon (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(12): 4275—4281
- [29] 郑聚峰, 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. 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 (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4): 485—494
- [30] 朱咏莉, 吴金水, 童成立, 等. 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. Zhu Y L, Wu J S, Tong C L, et al. Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field (In Chinese). Environmental Science, 2008, 29(4): 1040—1044
- [31] 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. Forest Ecology and Management, 1996, 84(1/3): 81—95
- [32] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 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 (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 972—978
- [33] 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. Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 14—20
- [34] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 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. 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 (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(6): 758—764
- [35] 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. Meng L, Ding W X, Cai Z C. The effect of temperature and water on soil respiration in long-term fertilized fluvo-aquic soil (In Chinese). Ecology and Environment, 2008, 17(2): 693—698
- [36] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different texture interactions with soil moisture contents and soil CO₂ concentrations. Plant and Soil, 2000, 227(1/2): 215—221
- [37] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 干湿交替格局下黄土高原小麦田土壤呼吸的温湿度模型. 生态学报, 2009, 29(6): 3028—3035. Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, et al. Modeling soil respiration using temperature and soil moisture under alteration of dry and wet at a wheat field in the Loess Plateau, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3028—3035
- [38] Zhou Z Y, Zhang Z Q, Zha T G, et al. Predicting soil respiration using carbon stock in roots, litter and soil organic matter in forests of Loess Plateau in China. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57: 135—143
- [39] Tomotsune M, Yoshitake S, Watanabe S, et al. Separation of root and heterotrophic respiration within soil respiration by trenching, root biomass regression, and root excising methods in a cool-temperate deciduous forest in Japan. Ecological Research, 2013, 28: 259—269
- [40] Balogh J, Pinter K, Foti S, et al. Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO₂ uptake in dry grasslands. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(5): 1006—1013
- [41] Akburak S, Makineci E. Temporal changes of soil respiration under different tree species. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185: 3349—3358
- [42] 井艳丽, 关德新, 吴家兵, 等. 光合作用调控土壤呼吸研究进展. 应用生态学报, 2013, 24(1): 269—276. Jing Y L, Guan D X, Wu J B, et al. Research progress on photosynthesis regulating and controlling soil respiration (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 269—276

RESPIRATION OF UPLAND SOIL UNDER CONSERVATION TILLAGE IN PURPLE HILLY REGIONS AND ITS INFLUENCING FACTORS

Zhang Sai Wang Longchang[†] Zhang Xiaoyu Zhou Hangfei

(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 To investigate effects of tillage pattern on soil respiration in dry cropping farmlands in purple soil hilly region in Southwest China, an LI6400-XT portable photosynthesis measurement system equipped with a soil respiratory chamber (6400-09) was used in an experiment conducted in the experimental field of the Southwest University in Beibei, Chongqing. Respiration and hydrothermal factors of the soils under the same wheat/corn/soybean triple intercropping system, but different tillage patterns were measured and analyzed during the crop growing period. The tillage patterns or treatments were coded as 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) and each had 3 replicates. Results show that soil respiration rate varied significantly with the season and from treatment to treatment as well. The daily mean soil respiration rate under wheat and soybean in the wheat-soybean row was $1.53 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and $4.10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively and varied between treatments, displaying an order of $T < R < TS < TSD < RS < RSD$. In the blank-corn-black row, the daily mean soil respiration rate of the soil under corn reached $2.56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ranging between those under wheat and soybean, and varied between treatments, displaying an order of $R < T < RS < TS < RSD < TSD$. The total soil respiration rate of the field under the intercropping system was $1.54 \sim 2.13 \text{ g m}^{-2}$ and varied between treatments, displaying an order of $T < R < RS < TS < TSD < RSD$. The experiment also shows that soil temperature and soil moisture content were the two major factors affecting soil respiration, explaining $28.9\% \sim 53.7\%$ and $13.7\% \sim 42\%$ of its seasonal variation. Regression analysis of the relationship between soil respiration and soil hydrothermal factors reveals that exponential equation ($R_s = 0.311e^{0.095T}$) fits well the relationship between soil respiration and soil temperature at 10 cm in soil depth and the temperature sensitivity index (Q_{10}) of soil respiration was $2.25 \sim 2.69$. However, the relationship between soil respiration and soil moisture content can be best described with a parabolic function. The threshold of soil moisture soil respiration responds to was 14.94% . In short, the findings may serve as reference to the study on rules of the variation of soil respiration in the farmland ecosystem and mechanisms for controlling its affecting factors, and are of some important significance to global carbon budgeting and assessment of regional carbon sources and pools.

Key words Conservation tillage; Soil respiration; Soil temperature; Soil moisture content; Relational model

(责任编辑:汪枫生)