

新疆棉田小区域碳变化量研究

张金玺^{1,2}, 范文波^{1,2}, 刘芳婷^{1,2}, 董倩倩^{1,2}, 魏建涛^{1,2}, 李长晓^{1,2}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 为研究膜下滴灌条件下棉田小区域碳变化量, 在棉花生长期采用 Li-8100A 土壤碳通量自动测定仪和 LCpro+ 光合仪连续观测不同样地土壤呼吸速率和净光合速率。结果表明: 不同样地的土壤呼吸速率日变化均表现为单峰型曲线, 峰值出现在 16:00; 而棉田净光合速率日变化则表现为单双峰曲线交替变化规律。两者月变化均呈现先升高后降低的趋势, 7 月土壤呼吸速率和净光合速率达到最大值。不同样地间土壤呼吸速率和净光合速率存在差异, 土壤呼吸速率表现为垄间 > 垄上 > 裸地, 净光合速率表现为垄间 > 垄上。棉田小区域在棉花整个生育期内均表现为碳汇, 6—9 月棉田净固碳总量为 2 203.7 C g/m², 光合作用固碳量为土壤呼吸排碳量的 2.67 倍。

关键词: 棉田小区域; 土壤呼吸速率; 净光合速率; 碳变化量

中图分类号: S562; Q945.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0172-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.026

Study on Carbon Variation in Small Areas of Cotton Fields in Xinjiang

ZHANG Jinxi^{1,2}, FAN Wenbo^{1,2}, LIU Fangting^{1,2},

DONG Qianqian^{1,2}, WEI Jiantao^{1,2}, LI Changxiao^{1,2}

(1. College of Water & Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003; 2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003)

Abstract: In order to study the carbon variation in cotton field under drip irrigation, the soil respiration rate and net photosynthetic rate were observed continuously during the cotton growth period using Li-8100A soil carbon flux automatic analyzer and LCpro+ photosynthetic apparatus. The results showed that the diurnal variation of soil respiration rates showed a unimodal curve with the peak at 16:00, while the diurnal variation of net photosynthetic rates in cotton field showed an alternating pattern of unimodal and bimodal curves. Both months showed a trend of increasing first and then decreasing, and the soil respiration rates and net photosynthetic rates reached the maximum in July. There were differences in soil respiration rates and net photosynthetic rates between different regions. The soil respiration rates were as follows inter-ridges > ridges > bare land, and the net photosynthetic rates was inter-ridges > ridges. The small area of cotton field showed carbon sinks throughout the growth period. From June to September, the total net carbon fixation in cotton fields was 2 203.7 C g/m², and the carbon sequestration by photosynthesis was 2.67 times that of soil respiration.

Keywords: small area of cotton field; soil respiration rate; net photosynthetic rate; carbon variation

土壤是陆地生态系统的主要碳库^[1], 碳储量约占生物圈陆地总碳储量的 2/3。土壤呼吸是土壤释放 CO₂ 的过程, 是全球碳循环的重要组成部分^[2-3], 也是土壤碳库的主要输出途径和大气 CO₂ 的重要来源, 目前已成为全球碳循环研究中备受关注的核心问题。据估计, 全球陆地生态系统有机碳总储量为 1 300~2 000 Pg C^[4], 而每年由土壤呼吸释放到大气中的土壤碳通量达到 68~100 Pg C^[5], 约为大气碳含量的 2

倍。土壤 CO₂ 排放量的微小变化会导致大气中 CO₂ 浓度的明显改变, 从而在很大程度上影响着区域乃至全球性未来气候变暖趋势^[6]。严俊霞等^[7]通过对油松、草地和灌木地的土壤呼吸进行测定, 发现 3 个样地的土壤 CO₂ 年(3—12 月)释放量为 854.9~1 297.2 g/(m²·a), 平均值为 1 052.2 g/(m²·a)。Kang 等^[8]通过对朝鲜半岛中部 6 个混合硬木森林山坡进行土壤呼吸的研究, 得出土壤 CO₂ 释放量在 1 070~

收稿日期: 2018-11-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(51569028); 农田滴灌工程系统优化与信息发展战略项目(2018-XY-036-2)

第一作者: 张金玺(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 517136290@qq.com

通信作者: 范文波(1975—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业节水灌溉理论与技术研究。E-mail: fwb205@163.com。

1 246 g/(m²·a),不同地区间土壤 CO₂ 释放量的大小有所不同,表现出明显的区域性特点,这可能与地区的地形地貌、气候、植被、土壤类型等因素有关。

植物的光合作用是大气 CO₂ 进入土壤的主要通道,CO₂ 浓度在一定程度上影响着植物的光合作用。郝兴宇等^[9]通过研究 CO₂ 浓度对大田条件下盆栽绿豆叶片光合生理参数的影响,发现随着 CO₂ 浓度的升高,花荚期绿豆叶片净光合速率(P_n)升高了 11.7%。杨志刚等^[10]在对辣椒进行 CO₂ 加富试验时,也得出了相似的结论,同时还指出植物在适应一定浓度 CO₂ 后会出现光合速率先升高后降低的现象,称为光合适应现象。

土壤呼吸的物质基础来源于光合作用,光合作用决定了地上部分供应糖类的能力,供需之间的相互作用控制着根和土壤呼吸作用^[11],土壤呼吸所释放的 CO₂ 量与植物光合作用所固定的 CO₂ 量二者之间的差值是判断农田土壤究竟是碳源还是碳汇的重要依据,也是全球关注的热点问题之一。近年来,国内外学者^[12-15]就土壤呼吸和光合作用进行了许多研究,但有关土壤呼吸与光合作用之间相互关系的研究报道较少。因此,本研究以棉田为研究对象,测定棉花不同生育阶段的光合作用以及垄上、垄间和裸地的土壤呼吸速率,综合分析棉田小区域不同样地土壤呼吸速率与净光合速率之间的关系以及两者对环境因子的响应作用,为评价该区域碳收支平衡和预测土壤呼吸对全球气候变化的影响提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 6—9 月在石河子大学节水灌溉试验站暨现代节水灌溉兵团重点试验站(44°19'29" N, 85°59'47" E)进行。平均海拔 415 m,平均地面坡度 5.6%,属典型的温带大陆性气候,年平均日照时间 2 865 h,≥10℃积温为 3 480℃,≥15℃积温为 2 960℃,多年平均降水量在 200 mm,年均蒸发量 1 600 mm,无霜期 170 d。试验地土壤质地为砂壤土,田间持水率(质量百分数)20.15%,0—20 cm 耕层土壤有机质含量 15.35 g/kg。

1.2 样地设置及测定方法

在试验站棉田选取 3 种不同的样地,分别为垄上、垄间和裸地。在每种样地随机选取 3 个测定点。采用 Li-8100A(美国)土壤碳通量自动测定仪测定各测点的土壤呼吸速率。将内径 20 cm,高 11.5 cm 的 PVC 环嵌入土壤中使其露出地表 5~7 cm 以保证测量气室的密闭性,并清除 PVC 环中植被和凋落物,待

稳定 24 h 后开始测定,以尽可能减少土壤扰动及地上植被呼吸对测量结果的影响。试验于 6 月 15 日进行第 1 次测定,之后每隔 10~15 天测定 1 次,每次测定时间为 10:00—20:00,时间间隔为 2 h,每个测定点重复测量 3 次,每次测量顺序均相同。在测定土壤呼吸的同时采用仪器自身配置的温度、水分探头对 5 cm 深度的土壤温度和土壤含水率进行测定,采用烘干法对探头所测数据进行校核。

棉花品种为“农丰 133 号”,于 4 月 25 日播种,9 月 25 日收获,密度 19 000 株/hm²,棉花全生育期共施肥 9 次,每次施用氮肥 90 kg/hm²,钾肥 60 kg/hm²,磷肥 20 kg/hm²。采用膜下滴灌方式进行棉田灌溉,全生育期灌溉水量为 4 500 m³/hm²。在棉花不同生育阶段选取棉花功能叶采用 LC pro+全自动便携式光合仪(英国)测定其净光合速率(P_n),测定时使用光合仪自带光源,控制光照强度为 1 500 μmol/(m²·s),测定时间为 10:00—20:00,时间间隔为 2 h,每个测点连续测量 3 株,每株棉花选取 3 片叶子进行测定并取平均值。

1.3 土壤碳排放量计算

已有研究^[16-17]中,1 μmol CO₂/(m²·s)=1.036 8 C g/(m²·d),根据测定的土壤呼吸速率和净光合速率的数值及相应的时间换算出棉花生长过程中棉田碳变化量(kg/hm²,以 C 计)。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS 20.0 软件进行数据分析,采用 Origin 8.5 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同样地土壤呼吸速率日变化特征

选择棉花生长期(蕾期、花铃期和吐絮期),分析棉田不同样地土壤呼吸速率与土壤温度的日动态变化特点。由图 1 可知,垄间、垄上和裸地 3 种样地土壤呼吸速率的日变化均呈“单峰”型曲线。从 10:00 到 16:00,土壤呼吸速率与土壤温度变化趋势相同,呈递增趋势,最大值均出现在 7 月 20 日的 16:00,垄间、垄上和裸地最大值分别为 8.32, 6.88, 1.86 μmol/(m²·s)。从 16:00—20:00,土壤温度持续升高,而土壤呼吸速率开始出现回落,逐渐降低,垄间、垄上和裸地土壤呼吸速率的最小值分别为 3.57, 2.79, 0.82 μmol/(m²·s)。

7 月垄间土壤呼吸速率日均变化幅度为 1.64 μmol/(m²·s),日变化均值为 6.37 μmol/(m²·s),是 6,8,9 月的 1.19, 1.19, 1.63 倍。7 月垄上土壤呼吸速率日均变化幅度为 1.63 μmol/(m²·s),日变化均值为 5.38 μmol/(m²·s),是 6,8,9 月的 1.27, 1.37, 1.94

倍。7月裸地土壤呼吸速率日均变化幅度为 $0.51 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化均值为 $1.58 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是 6, 8, 9 月的 1.27, 1.24, 1.70 倍。

通过对比棉田小区域内土壤呼吸速率日变化特

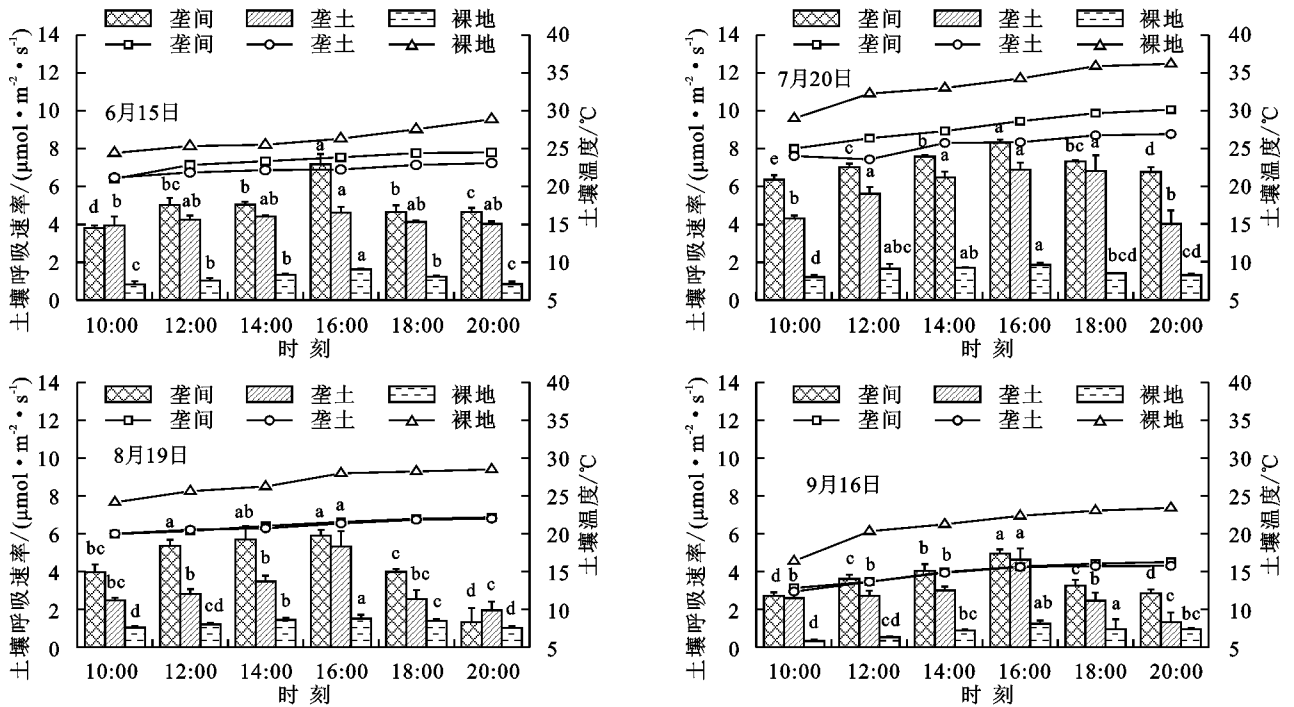


图 1 土壤呼吸与土壤温度日变化特征

2.2 不同样地棉花净光合速率日变化特征

在测定土壤呼吸速率的同时,测定垄上和垄间棉花叶片的净光合速率,分析棉田垄上和垄间 2 种样地净光合速率及大气温度的日变化特点。由图 2 可知,垄间和垄上的棉花净光合速率日变化趋势相同且差异较小,均呈现出单、双峰交替变化曲线。7 月棉田净光合速率呈现双峰曲线变化,而 6, 8, 9 月表现为单峰曲线。净光合速率最大值出现在 7 月 7 日,第 1 个峰值出现在 12:00,垄间和垄上的峰值分别为 $28.62, 26.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在 14:00 时,大气温度最高,棉花出现光合“午休”现象,净光合速率降低。第 2 个峰值出现在 16:00,垄间和垄上的峰值分别为 $24.72, 24.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。7 月垄间净光合速率日均变化幅度为 $21.45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化均值为 $17.83 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是 6, 8, 9 月的 1.12, 1.23, 1.77 倍。7 月垄上棉花净光合速率日均变化幅度为 $20.08 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 日变化均值为 $17.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是 6, 8, 9 月的 1.16, 1.21, 2.10 倍。

比较棉田小区域环境内棉花净光合速率日变化特征可以看出,不同样地棉田净光合速率存在差异,具体表现为:垄间>垄上。7 月 7 日,垄间棉花净光合速率均值为 $18.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 比垄上增加了 3%。

2.3 棉田土壤呼吸与净光合速率月变化特征

2018 年 6—9 月,各样地土壤呼吸速率和棉花净

征,可以看出不同样地土壤呼吸速率存在一定差异性,具体表现为:垄间>垄上>裸地。7 月 20 日,垄间土壤呼吸速率均值为 $7.23 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 较垄上和裸地增加了 1.26, 5.64 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

光合速率与温度的月变化特征见图 3。随着棉花生长过程的推进,不同样地的土壤呼吸速率与棉花净光合速率总体呈现出先升高后降低的变化趋势,与温度的变化规律大致相同。从 6—7 月随着温度的不断升高,土壤呼吸速率和棉花净光合速率呈递增趋势,土壤呼吸速率变化范围在 $0.83 \sim 8.32 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 净光合速率变化范围在 $5.02 \sim 28.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。7 月中下旬土壤温度最高,各测点土壤呼吸速率达到最高水平,而净光合速率在 7 月中上旬大气温度相对较高时达到最高水平,较土壤呼吸速率出现最大值提前 10 天左右。从 7 月中下旬到 9 月,温度开始逐渐降低,各测点土壤呼吸速率和净光合速率开始逐渐降低。对于增长部分,棉田垄间、垄上和裸地的平均土壤呼吸速率分别为 $5.86, 4.81, 4.41 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 垄间和垄上的棉花净光合速率分别为 $17.45, 16.83 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。对于下降部分,棉田垄间、垄上和裸地的平均土壤呼吸速率分别为 $4.34, 3.36, 1.10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 垄间和垄上的棉花净光合速率分别为 $12.95, 11.64 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

比较 3 种样地土壤呼吸速率和 2 种样地棉花净光合速率,发现各测点土壤呼吸速率和棉花净光合速率的月变化呈现一致的规律性,各个测定时期土壤呼吸速率差异均表现为垄间>垄上>裸地,棉花净光合速率差异表现为垄间>垄上。

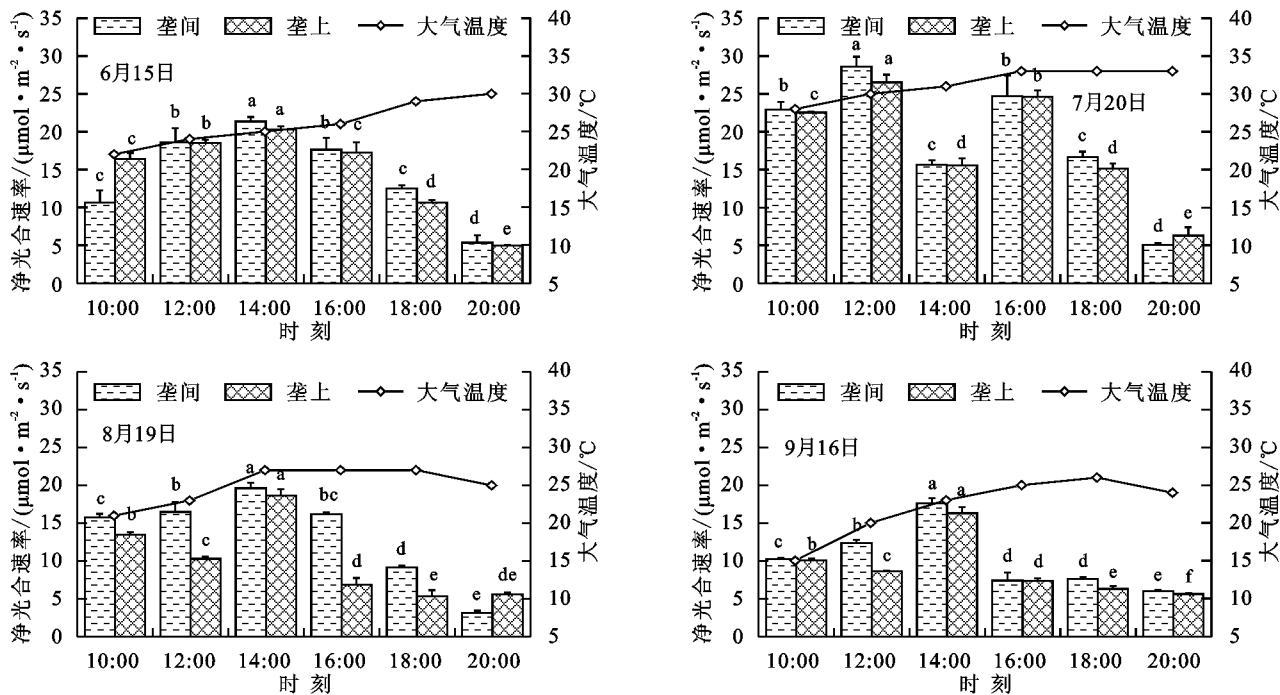


图 2 棉花净光合速率与大气温度日变化特征

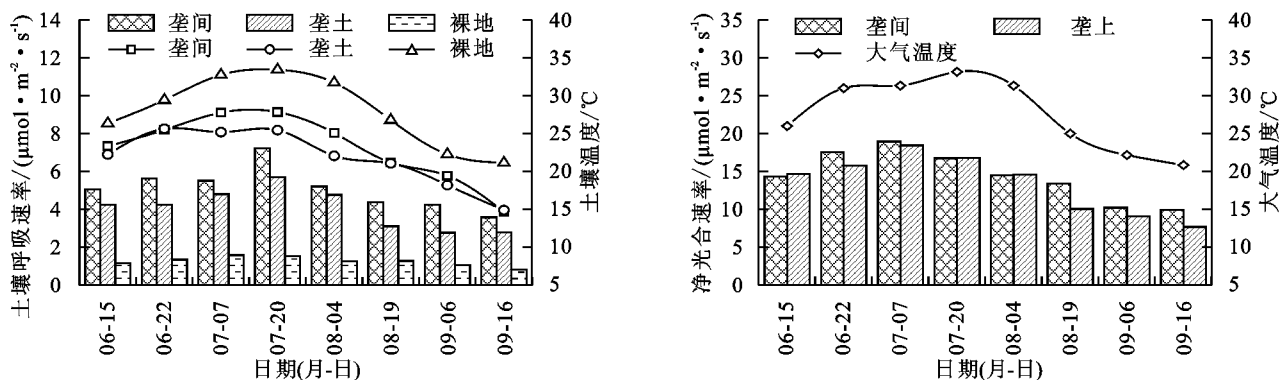


图 3 土壤呼吸速率与净光合速率月变化特征

2.4 棉田土壤呼吸速率与净光合速率的相关关系

对棉花生长过程中不同样地土壤呼吸速率与净光合速率进行非线性拟合。由图 4 可知,不同样地棉花净光合速率与土壤呼吸速率呈指数相关关系,显著水平均达到 0.01 以上,表现为极显著相关性,垄间和垄上的决定系数 R^2 分别为 0.508 和 0.741,说明棉花净光合速率能够解释棉田土壤呼吸速率变化的 50.8%~74.1%。

进一步对土壤呼吸速率与土壤温度及棉花净光合速率与大气温度进行拟合(图 4),结果表明土壤呼吸速率和棉花净光合速率均与温度呈指数正相关关系,垄间、垄上和裸地的决定系数分别为 0.777, 0.627, 0.837,表明土壤温度能够解释土壤呼吸变化的 62.7%~83.7%,大气温度能够解释棉花净光合速率变化的 74.7%~78.7%。

由图 4 可知,在一定范围内,土壤呼吸速率与土壤含水率表现出显著地相关性,当土壤含水率较低时,土壤呼吸速率较低,当土壤含水率在 15%~25% 时,土壤呼吸速率随着土壤含水率的增加而增加,土

壤呼吸变化的 70% 由土壤含水率的变化引起。

2.5 棉花生长期碳变化量特征

由各测定点月土壤呼吸速率均值和对应月份的天数,可得到不同样地的月土壤呼吸碳释放量和光合作用固碳量(表 1)。由表 1 可知,同一样地不同月份的土壤呼吸碳释放量与光合作用固碳量的变化趋势相同,均表现为 7 月 > 6 月 > 8 月 > 9 月,7 月土壤呼吸碳排放量和光合作用固碳量达到最大值,排碳量高达 6.60 C g/(m²·d),固碳量高达 18.49 C g/(m²·d)。6—9 月 3 种样地的月土壤呼吸碳排放总量在 28.94~204.73 C g/m²,垄间土壤呼吸排碳总量最大,是垄上和裸地的 1.25, 4.06 倍。6—9 月,2 种样地的月光合作用固碳总量在 260.64~573.16 C g/m²,垄间光合作用固碳总量最大,是垄上的 1.08 倍。6—9 月,棉田始终表现为碳汇,光合作用固碳量最大值出现在 7 月,总固碳量可达 1 139.6 C g/m²,是土壤呼吸 7 月总排碳量 2.66 倍。6, 8, 9 月光合作用固碳量分别是土壤呼吸排碳量的 3.18, 2.63, 2.42 倍。在棉花生育期

内,棉田净固碳量整体呈现出先增加后降低的趋势,7月净固碳量最大,高达 710.96 C g/m²,是 6,8,9 月

的 1.12,1.36,2.11 倍。全生育期内棉田净固碳总量为 2 203.77 C g/m²。

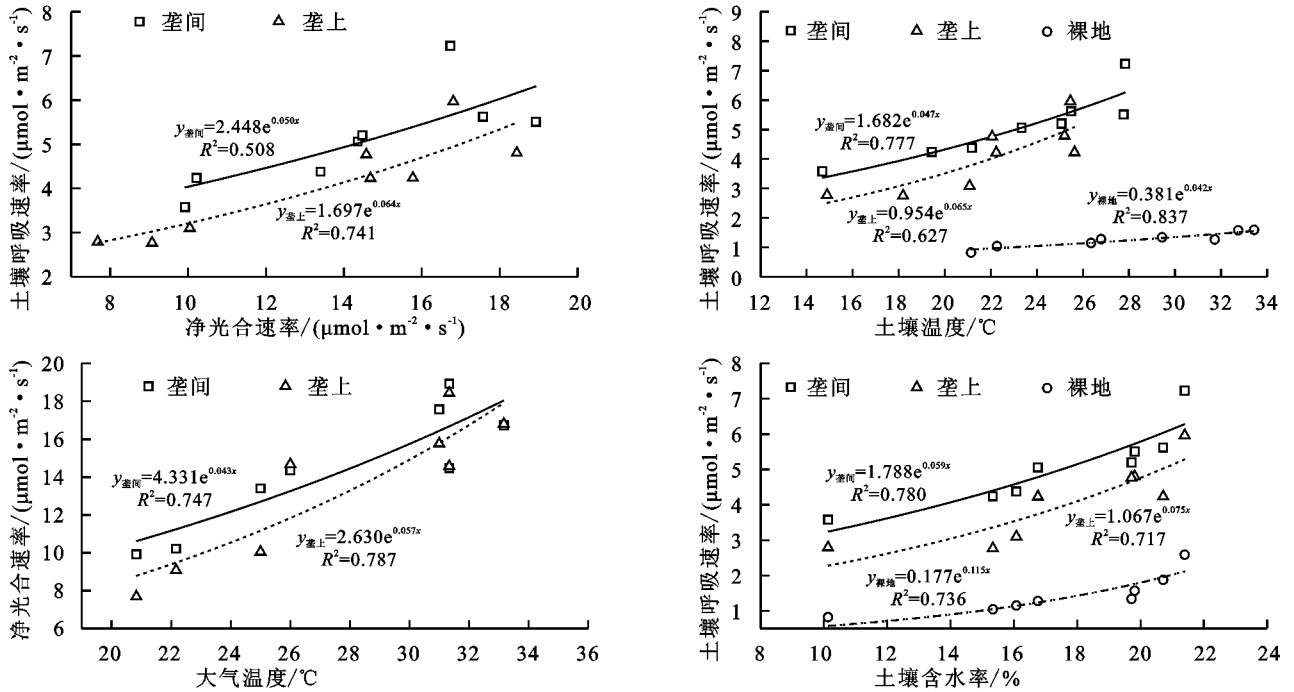


图 4 土壤呼吸速率及棉花净光合速率与土壤温度、含水率的关系

表 1 不同样地土壤碳排放量及碳固定量

单位: C g/m²

测定指标	样地	6 月	7 月	8 月	9 月	合计
土壤呼吸碳排放量	垄间	166.14	204.73	153.92	121.51	646.29
	垄上	131.68	173.07	126.43	86.45	517.63
	裸地	38.66	50.85	40.84	28.94	159.29
光合作用碳固定量	垄间	496.48	573.16	447.86	313.14	1830.74
	垄上	473.59	566.45	395.67	260.64	1696.36
全生育期净固碳总量		633.59	710.96	522.34	336.88	2203.77

3 讨论

3.1 土壤呼吸速率动态变化特征

土壤呼吸作为大气 CO₂ 的主要来源,主要通过影响植物生长物质积累和代谢产物分配等过程进一步影响土壤—大气碳循环。本研究发现,3 种样地土壤呼吸速率日变化均呈单峰型曲线,这与其他生态系统土壤呼吸速率日变化基本一致,但峰值大小和出现的时间与不同研究者在不同区域条件下的研究结果不同,这可能与气候环境、测定季节和土壤类型等有关。本研究发现,土壤呼吸速率的最大值出现在 16:00,比以往研究^[18-19]的 12:00—14:00 延后 2 h。

土壤呼吸是一种复杂的生物学过程,受多种因素影响。其季节变化主要受土壤温度、湿度以及植物光合作用共同驱动,其中温度是土壤呼吸变化的主控因素。已有研究^[20]表明,土壤呼吸和温度之间具有显著的相关关系,主要有二次方程关系、指数关系等,温度变化一般可以解释土壤呼吸日变化和季节性变化的大部分变异^[21]。本研究发现,不同样地土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的正相关指数关系,土壤温度分别解释了垄间、垄上和

裸地土壤呼吸变化的 77.7%,62.7%,83.7%。

土壤含水率是影响土壤呼吸速率的另一个重要因子,尤其在干旱或半干旱地区,当土壤水分成为胁迫因子时可能取代温度而成为土壤呼吸的主控因子^[21],其主要通过影响土壤通气透水性进而对土壤呼吸产生影响。已有研究^[22]表明,土壤含水率与土壤呼吸呈现较好的二次函数关系,Liu 等^[21]引用双曲线方程模型来模拟土壤呼吸和土壤湿度之间的关系时发现,在一定土壤湿度范围内,土壤呼吸大体上随着湿度的增加而增加。本研究发现,在一定范围内土壤呼吸速率与土壤含水率呈指数关系,即土壤含水率处于 15%~25% 范围内时,土壤呼吸速率与含水率呈显著正相关关系,土壤含水率可以解释土壤呼吸速率变化的 70%,以上结果表明土壤温度和含水率共同作用影响土壤呼吸作用。本研究发现,棉田不同样地的土壤呼吸速率均表现出明显的季节变化(图 3),整体呈现出先升高后降低的趋势,与前人^[23]的研究结果相同。

不同样地间土壤呼吸速率存在明显的差异,其中垄间的土壤呼吸速率高于垄上,这可能是由于垄上棉

花种植密度大,受太阳光照较弱,土壤温度低,且棉花根部之间存在竞争关系,导致垄上棉花根部发育较差,根系呼吸和土壤呼吸受抑制。反而垄间地质开阔,棉花遮阴少,受太阳光照较强,土壤温度较高,土壤微生物活性增强,土壤呼吸较为强烈。不同样地的土壤呼吸速率峰值均出现在7月中下旬,这与张前兵等^[12]的研究结果相符。

3.2 棉花净光合速率动态变化特征

植物光合作用是固定大气 CO₂ 的主要途径,主要通过吸收土壤排放的 CO₂ 量和大气中的 CO₂ 提供作物生物量,积累作物产量。本研究发现,垄上和垄间的棉花净光合速率日变化表现为单双峰曲线交替变化趋势,在温度最高的7月为双峰曲线变化,且在12:00和16:00出现2个峰值,而在温度稍低的6,8月及温度最低的9月,棉花净光合速率呈现单峰曲线变化趋势,峰值出现在14:00。这与其他研究者得到的结论有一定差异,可能与研究区域的土壤质地、气象条件和作物生理特征等有关。

植物净光合速率变化受大气温度和土壤呼吸作用共同影响^[24-27]。本试验测得,在气温和土壤呼吸作用的双重影响下,植物净光合速率表现出不同的响应特征。

6—7月,随着气温的上升,土壤呼吸速率和棉花净光合速率持续增强,在7月,气温和土壤温度达到最大值,且光合作用一直大于土壤呼吸作用,棉田表现为碳汇。7—9月,随着气温的回落,土壤微生物活动和根系活力受抑制,土壤呼吸速率减小^[28],在温度和土壤呼吸速率双重减缓的影响下,棉花净光合速率显著下降,其中光合作用的固碳量仍大于土壤呼吸的排碳量,棉田依旧表现为碳汇。对于光合速率的日变化而言,从10:00—20:00,土壤呼吸速率随着温度的增加而增加,当气温达到一个阈值时,叶片气孔闭合,出现光合“午休”现象,净光合速率有所下降,棉花净光合速率的日最低值仍高于土壤呼吸速率的日最大值,棉田依旧表现为碳汇。

3.3 棉田排碳量变化情况

土壤通过土壤呼吸作用释放 CO₂,植物通过光合作用固定 CO₂,二者相互作用共同影响大气温室气体(CO₂)变化。土壤呼吸速率与植物净光合速率在不同程度上受温度与水分的影响。温度主要通过影响土壤微生物活性、植物根系呼吸强度和有机质分解速率对土壤碳排放产生影响,在一定范围内升高温度,土壤微生物活性和植物根系呼吸作用增强,从而导致土壤呼吸速率增大,碳排放量增加,反之,降低温度土壤碳排放量也随之减少^[29]。

当温度不高时,土壤呼吸速率及植物净光合速率始终与温度呈正相关关系,且净光合速率一直大于土壤呼吸

速率。随着温度的持续升高,当达到一定阈值时,土壤呼吸速率及棉花净光合速率与温度的相关关系发生变化。土壤呼吸速率的最大值出现时间较棉花净光合速率延后2h,这可能是棉花出现了光合适应现象^[10]。

4 结论

(1)棉田小区域土壤呼吸速率与棉花净光合速率均表现出明显的时间变化。土壤呼吸速率日变化呈单峰型曲线变化,峰值出现在16:00左右;棉花净光合速率日变化呈单双峰曲线交替变化趋势,双峰曲线出现在7月份,第1个峰值出现在12:00左右,第2个峰值出现在16:00左右,单峰曲线峰值出现在14:00左右。土壤呼吸速率与棉花净光合速率月变化均呈现先升高后降低的趋势,与温度变化规律相同。

(2)不同样地土壤呼吸速率与棉花净光合速率存在显著性差异,土壤呼吸速率表现为垄间>垄上>裸地,棉花净光合速率表现为垄间>垄上,均与温度和含水率呈显著的正相关指数关系,土壤温度和含水率能够解释土壤呼吸变化的70%。土壤呼吸速率与棉花净光合速率具有密切的相关关系,且相关性大于温度对其的影响。

(3)棉田小区域在棉花整个生育期内均表现为碳汇。在棉花净光合速率和土壤呼吸速率的日变化和月变化中,棉田净光合速率始终大于土壤呼吸速率,6—9月,棉田净固碳总量为2 203.7 C g/m²,其中光合作用固碳量为土壤呼吸排碳量的2.67倍。

参考文献:

- [1] Lohila A, Aurela M, Regina K, et al. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type [J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(1/2): 303-317.
- [2] 陈光水,杨玉盛,王小国,等. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 1941-1947.
- [3] 刘允芬,欧阳化,张宪洲,等. 青藏高原农田生态系统碳平衡[J]. *土壤学报*, 2002, 39(5): 636-642.
- [4] Li K Q, Wang S Q, Cao M K. Vegetation in China and soil carbon content [J]. *Science in China*, 2003, 33(1): 77-80.
- [5] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44: 81-99.
- [6] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7-20.
- [7] 严俊霞,李洪建,汤亿,等. 小尺度范围内植被类型对土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(11): 3121-3129.
- [8] Kang S, Doh S, Lee D, et al. Topographic and climatic

- controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1427-1437.
- [9] 郝兴宇, 韩雪, 李萍, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对绿豆叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2776-2780.
- [10] 杨志刚, 崔世茂, 胡栓红, 等. 长期 CO₂ 加富对温室辣椒结果期光合生理及产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(12): 1-8.
- [11] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 466-474.
- [12] 张前兵, 杨玲, 孙兵, 等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 77-84.
- [13] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 长期定位施肥下黑土呼吸的变化特征及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 151-161.
- [14] 郭丽, 郑春莲, 曹彩云, 等. 长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 183-190.
- [15] 朱延凯, 王振华, 李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 298-305.
- [16] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(12): 2420-2430.
- [17] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(9): 3354-3360.
- [18] 车宗玺, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山放牧草原土壤呼吸及影响因子分析[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 172-175.
- [19] 张晓龙, 沈冰, 权全, 等. 渭河平原农田冬小麦土壤呼吸及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2551-2560.
- [20] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [21] Liu X Z, Wan S Q, Su B, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(1/2): 213-223.
- [22] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2002, 23(5): 972-978.
- [23] 陈亮, 刘子亭, 韩广轩, 等. 环境因子和生物因子对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1795-1803.
- [24] 匡经舸, 李琬婷, 程小毛, 等. 两种樱花植物的光合速率日变化及其与环境因子的相关性分析[J]. *北方园艺*, 2017(12): 78-82.
- [25] 厉书豪, 李曼, 张文东, 等. CO₂ 加富对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片光合特性及活性氧代谢的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2-9.
- [26] 李晨曦, 何章, 夏冬冬, 等. 农田人参叶片净光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9): 199-205.
- [27] 刘瑜, 尹飞虎, 曾胜和, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对棉花叶绿素和光合指标的影响[J]. *新疆农业科学*, 2013, 50(11): 1991-1999.
- [28] 刘芳婷, 范文波, 张金玺, 等. 膜下滴灌棉田土壤呼吸特征及其影响因素[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(8): 767-772.
- [29] 王珊, 党晓宏, 高永, 等. 西鄂尔多斯高原 5 种荒漠灌丛土壤碳排放特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 796-803.

(上接第 171 页)

- [12] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2075-2080.
- [13] 牛亚茹, 付祥峰, 邱良祝, 等. 施用生物质炭对大棚土壤特性、黄瓜品质和根结线虫病的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 57-62.
- [14] 王成己, 陈庆荣, 陈曦, 等. 烟秆生物质炭对烟草根际土壤养分及细菌群落的影响[J]. *中国烟草科学*, 2017, 38(1): 42-47.
- [15] 李丽, 王雪艳, 田彦芳, 等. 生物质炭对土壤养分及设施蔬菜产量与品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1237-1244.
- [16] 谢国雄, 王道泽, 吴耀, 等. 生物质炭对退化蔬菜地土壤的改良效果[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(1): 67-71.
- [17] 宋丹丹, 何丙辉, 罗松平, 等. 黑麦草和生物炭对喀斯特地区黄壤养分影响研究[J]. *草业科学*, 2018, 27(4): 195-201.
- [18] 吴涛, 冯歌林, 曾珍, 等. 生物质炭对盆栽黑麦草生长的影响及机理[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 525-534.
- [19] 贵州省土壤普查办公室. 贵州土种志[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1994.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 靖彦, 陈效民, 李秋霞, 等. 生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 265-269.
- [22] 张登晓, 周惠民, 潘根兴, 等. 城市园林废弃物生物质炭对小白菜生长、硝酸盐含量及氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1569-1576.
- [23] 周强, 李嘉雨, 黄兆琴, 等. 培养条件下生物炭对土壤锌的吸附作用[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4): 969-974.