

DOI: 10.5846/stxb201810162236

傅勇, 王淘, 杨志平, 周伟, 刘琦, 任万军, 陈勇. 川西平原灌区不同水旱轮作模式周年土壤呼吸特征. 生态学报, 2019, 39(18): - .

Fu Y, Wang T, Yang Z P, Zhou W, Liu Q, Ren W J, Chen Y. Annual soil respiration characteristics of different paddy-upland rotations in irrigation areas of the Western Sichuan Plain. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

川西平原灌区不同水旱轮作模式周年土壤呼吸特征

傅 勇, 王 淘, 杨志平, 周 伟, 刘 琦, 任万军, 陈 勇*

四川农业大学 农学院 / 作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 温江 611130

摘要:水旱轮作是川西平原灌区重要的稻田种植模式, 为探究本区域不同水旱轮作模式对周年土壤呼吸的影响, 在四川崇州设置蒜-稻(GR)、麦-稻(WR)和油-稻(RR)三种水旱轮作模式, 采用静态箱-气相色谱法测定不同模式周年土壤呼吸, 并同步测定温度、水层高度等水热生态因子。结果表明: 三种轮作模式周年土壤呼吸累积排放量表现为 GR>RR>WR, 分别为 193.36、160.27、157.28 kg/hm²; 土壤呼吸速率日动态规律基本一致, 均表现为单峰型变化趋势, 最高值出现在 12:00—15:00, 6—8 月的日变幅高于其余月份; 土壤呼吸速率季节动态均呈双峰型变化趋势, 在 6 月和 9 月达到峰值, 其中 GR 模式土壤呼吸速率年均值最高; 三种模式土壤呼吸速率均受 0—10 cm、10—20 cm 土壤温度的显著影响, 而与土壤含水量无显著相关性。土壤温度是旱季土壤呼吸速率季节变化的主要影响因素, 土壤水层深度和土壤温度共同作用影响了稻季土壤呼吸速率的变化。

关键词:水旱轮作模式; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤含水量

Annual soil respiration characteristics of different paddy-upland rotations in irrigation areas of the Western Sichuan Plain

FU Yong, WANG Tao, YANG Zhiping, ZHOU Wei, LIU Qi, REN Wanjuan, CHEN Yong*

College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology and Cultivation, Sichuan Province, Wenjiang 611130, China

Abstract: Paddy-upland rotation is the main cropping system in the irrigation area of the Western Sichuan Plain. In order to investigate the effects of different paddy-upland rotations on the annual soil respiration in this region, static chamber-gas chromatography was used to measure the soil respiration of garlic-rice (GR), wheat-rice (WR), and rape-rice (RR) models. The hydrothermal ecological factors, including the temperature and water layer height, were determined at the same time. The results showed that the cumulative discharges of soil respiration in the three rotation models were in the order of GR > RR > WR, at 193.36, 160.27, and 157.28 kg/hm², respectively. The daily dynamics of soil respiration were basically the same; all showed the unimodal variation trend, and the highest value appeared at 12:00—15:00. The daily variation from June to August was higher than that in the other months, and the seasonal dynamics of soil respiration showed a bimodal trend, with peaks in June and September. The annual average soil respiration rate of the GR model was the highest; the soil respiration of the three models was significantly affected by soil temperature at 0—10 cm and 10—20 cm, but there was no significant correlation with soil water content. Soil temperature is the main influencing factor of seasonal variation in soil respiration in the dry season, while a combination of soil water depth and soil temperature affects the variation in soil respiration in the rice growing season.

Key Words: paddy-upland rotation; soil respiration; soil temperature; soil water content

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFD0301702; 2018YFD0301204); 四川省育种攻关项目(2016NYZ0051)

收稿日期: 2018-10-16; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yongchen@sicau.edu.cn

工业革命以来,由于人类活动的影响,大气 CO_2 浓度急剧升高,增加了约 32%,全球正经历着变暖的危机^[1,2]。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%,是全球碳循环中最活跃的部分, CO_2 占人为温室气体排放量的 21%—25%,且受人类干扰频繁^[3]。土壤碳库是大气碳库的 2 倍,土壤中的 CO_2 浓度发生微量的变化,就会对大气中 CO_2 浓度造成巨大影响^[4, 5]。土壤呼吸是农田生态系统土壤碳排放的主要途径,土壤通过呼吸作用向大气释放 CO_2 的年通量为 5.0×10^{16} — 7.5×10^{16} g,是土壤碳素以 CO_2 形式回归大气碳库的主要路径,占陆地生态系统与大气之间碳交换总量的 2/3,对气候变化和碳循环起着不可忽视的重要作用^[6, 7]。土壤呼吸作为碳循环的核心问题已引起了国内外学者的密切关注和广泛研究,并取得了大量的研究成果。

近年来,我国农田生态系统土壤呼吸的研究主要集中在不同作物类型、土地利用方式或栽培措施下土壤呼吸的时空变异特征及调控因素的研究,研究对象涉及小麦、玉米、水稻等主要农作物^[8-10]。很多研究表明,农田土壤呼吸受环境因子共同调控,尤其土壤对温度和土壤含水量的响应十分敏感^[11-12]。也有研究表明,与土壤温度相比,土壤水分对土壤呼吸季节变化的影响更为重要^[13]。但前人关于作物系统的研究对象多为旱地轮作系统或单一作物系统,缺乏对稻田水旱轮作系统周年土壤呼吸的探索。水旱轮作是我国南方稻区十分重要的种植制度,但由于旱、水土壤环境转换,土壤理化性质、土壤有机质矿化分解速率、微生物种类、微生物数量和活性、根际生物量等发生剧烈变化,土壤呼吸随之受到极大的影响^[14, 15]。为了从周年种植模式角度探讨不同水旱轮作系统周年土壤呼吸特征及其影响因素,本研究基于蒜-稻、麦-稻以及油-稻三种川西平原灌区重要的水旱轮作模式的定位试验,探明不同轮作模式及其不同生长季土壤呼吸的变化趋势和差异特征;探明土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量等生态因子的关系,以期在水旱轮作系统减排降耗提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验设在四川省崇州市四川农业大学现代农业研发基地 ($30^\circ 33' \text{N}$, $103^\circ 38' \text{E}$), 位于川西平原都江堰灌区, 属亚热带湿润季风气候区。该区年平均气温 15.9°C , 平均降雨量 1012.4 mm, 平均日照时数为 1161.5 h。试验地基础养分含量为土壤有机质 31.58 g/kg, 全氮 1.85 g/kg, 速效磷 11.81 mg/kg, 速效钾 85.48 mg/kg。

1.2 试验设计与管理

试验地采用水旱轮作方式进行试验, 已连续进行 3 年的水旱轮作模式研究。采用单因素随机区组设计, 设置 3 个水旱轮作模式处理, 分别为小麦-水稻 (WR)、大蒜-水稻 (GR) 和油菜-水稻 (RR), 每年的处理保持一致, 3 次重复, 共 9 个小区, 小区面积为 26 m^2 ($4 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$)。除水稻季施肥采用氮肥后移技术外, 其余各作物施肥及管理方案均按照农民常规方法进行。本研究的时间范围为 2017 年 5 月—2018 年 5 月, 为 1 个完整的水旱轮作周期, 其中 2017 年 5 月—9 月为水稻季, 2017 年 9 月—2018 年 5 月为旱作季, 轮作周期的各作物播栽期及播栽密度见表 1, 耕作、施肥及管理措施见表 2。

表 1 各作物播栽期及播栽密度

Table 1 Seeding period and planting density of each crop

作物名称 Crop name	品种 Variety	播期(月/日) Sowing period	移栽期(月/日) Transplanting period	收获期(月/日) Harvest period	播栽规格 Seeding distance/cm	每穴苗数 Number of seedlings per hole
水稻 Rice	F 优 498	4/10	5/25	9/10	33.0×20.0	2.0
小麦 Wheat	川麦 104	10/20	—	5/5	20.0×10.0	5.0
油菜 Rape	川油 36	10/10	—	5/5	40.0×16.5	2.0
大蒜 Garlic	红七星	9/25	—	4/23	20.0×6.0	1.0

表 2 不同作物耕作、施肥及管理措施

Table 2 Tillage, fertilization and management measures for different crops

作物名称 Crop name	耕作措施 Tillage measures	播种方式 Seeding method	秸秆还田 Straw returning	肥料用量 Fertilizer dosage(kg/hm ²)			基肥追肥比例 Ratio of base fertilizer to top dressing		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
水稻 Rice	旋耕	移栽	—	180	90	180	7:13	全作基肥	1:1
小麦 Wheat	免耕	直播	—	165	99	99	全作基肥	全作基肥	全作基肥
油菜 Rape	免耕	直播	—	115	115	115	1:8	1:8	1:8
大蒜 Garlic	免耕	直播	覆盖还田	525	300	127.5	3:2	全作基肥	全作基肥

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤呼吸测定

土壤呼吸测定于 2017 年 5 月 25 日开始,每隔 30d 选择晴天(遇雨适当延后)进行土壤呼吸测定^[16,17]。其中,土壤呼吸季节动态选择取样当天 9:00—11:00 进行取样,土壤呼吸日动态取样从 9:00 至 18:00 每隔 3h 取样一次;18:00 至次日 6:00 每隔 4h 取样一次。水稻移栽后,于各小区行间分别放置 1 个由 PVC 材料制成的土壤呼吸气体收集装置,该装置参照王维钰等^[18]的设计,并根据田间取样环境进行了一定的改进,形成腔室高 25cm,直径为 16cm,插入土壤 5cm。腔室顶部为开放结构,开放部分直径为 11.5cm,确保腔室内外环境条件一致。取样时加盖密封,盖顶开有两个小孔,分别用于安装温度计和连接橡胶软管(橡胶软管连接至 PVC 腔室中心)。取样时加盖密封后,盖顶用橡胶软管连接注射器,采样时间为加盖后 0、10、20 和 30min,取 60mL 气体置于真空袋中待测,取样后立即用铁夹夹住橡胶软管保持密闭。样品浓度用岛津 2010Plus 气相色谱仪检测分析,通过对 4 个气样浓度进行线性回归,计算气体排放速率。气体排放速率计算公式如下^[19]

$$F=\frac{\rho \times 273}{273+T} \times H \times dC/dt$$

式中, F 为 CO_2 排放速率, $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$; ρ 为标准大气压下的 CO_2 密度,为 $1.97\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; T 为采样过程中腔室内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; H 是腔室的净高度,m; dC/dt 是采样气体浓度的变化率。

土壤呼吸累积排放量计算公式如下:

$$M=\sum\left[\frac{(Fi+1+Fi)}{2} / (ti+1-ti) \times 24\right]$$

式中, M 为土壤 CO_2 排放总量(kg/hm^2); F 为 CO_2 排放速率($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$); i 为第 i 次测定; $(t_{i+1}-t_i)$ 为相邻两次测定间隔天数。

1.3.2 水热生态因子测定

于每月土壤呼吸取样时,同步测定土壤温度、土壤含水量,稻季测定水层高度。土壤温度采用便携式温度测定仪测定,分 0—10cm 和 10—20cm 测定。各小区按五点取样法采集 0—20cm 土样,采用烘干法测定土壤含水量;田间水层高度用直尺测量。

1.3.3 土壤呼吸与水热因子拟合

土壤呼吸速率和土壤温度、土壤含水量和水层高度分别采用指数函数模型和一元二次模型拟合^[20,21]:

$$Y=ae^{bT}$$

$$Y=X^2+X+c$$

温度敏感性系数 Q_{10} 代表土壤呼吸的温度敏感性,计算公式如下^[17-18]:

$$Q_{10}=e^{\frac{10b}{1}}$$

式中, Y 为土壤呼吸速率($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), T 为平均温度($^{\circ}\text{C}$), a 为 0°C 时土壤呼吸速率, b 为温度反应系数, X 为土壤含水量(%), c 为截距, Q_{10} 指温度升高 10°C 时土壤呼吸速率变化的倍数。

1.3.4 数据处理

采用 SPSS13.0 进行数据处理,并用 Microsoft Excel 2010 作图。

2 结果分析

2.1 不同水旱轮作模式土壤呼吸速率季节变化特征

图 1 表明,三种模式土壤呼吸速率季节变化规律趋于一致,周年呈现双峰型变化趋势,6—9 月土壤呼吸速率显著高于其余月份。三种模式土壤呼吸速率分别在 6 月和 9 月达到峰值,其中 GR 和 RR 模式在 6 月达到全年呼吸速率最大值,分别为 $63.1\text{mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 和 $61.2\text{mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$,WR 模式则在 9 月达到全年呼吸速率最大值,为 $36.82\text{mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$;而三种模式土壤呼吸速率最低值出现在 1 月,GR、WR、RR 模式土壤呼吸速率最低值分别为 $3.89\text{mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 、 $4.49\text{mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 和 $1.42\text{mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 。不同模式之间,GR 模式全年平均土壤呼吸速率显著高于其余两种模式,而以 WR 模式最低。

2.2 不同作物生长季节土壤呼吸累积排放量

图 2 表明,GR、RR 和 WR 三种模式周年土壤呼吸累积排放量分别为 193.36kg/hm^2 、 157.28kg/hm^2 和 160.27kg/hm^2 ,其中累积排放最高的 GR 模式分别比 RR 和 WR 模式高 17.11% 和 18.5%。季间空闲期,WR 模式土壤呼吸累积排放量为 41.84kg/hm^2 ,显著高于其余两种模式;从不同作物生长季来看,GR、WR、RR 三种模式均在稻季累积排放量最高,分别占周年累积排放量的 49.28%、48.11% 和 58.33%;GR、WR、RR 三种模式稻季土壤呼吸累积排放量较旱季分别高 16.43kg/hm^2 、 35.88kg/hm^2 、 53.68kg/hm^2 。在稻季,GR 模式和 RR 模式的土壤呼吸累积排放量显著高于 WR 模式,两种模式分别比 WR 模式高出 25.93% 和 23.56%;而旱季 GR 模式土壤呼吸累积排放量达 78.5kg/hm^2 ,显著高于 WR 模式和 RR 模式,分别比 WR 模式和 RR 模式分别高出 98.23% 和 98.08%。

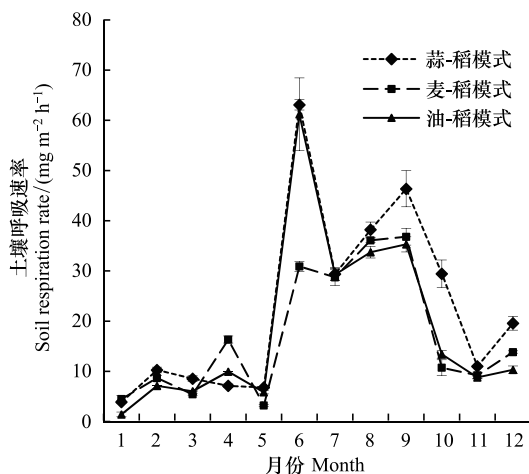


图 1 不同水旱轮作模式周年土壤呼吸速率特征

Fig.1 Characteristics of soil respiration rate in different paddy-upland rotation

GR, 蒜-稻模式 Garlic-rice pattern; WR, 麦-稻模式 Wheat-rice pattern; RR, 油-稻模式 Rape-rice pattern

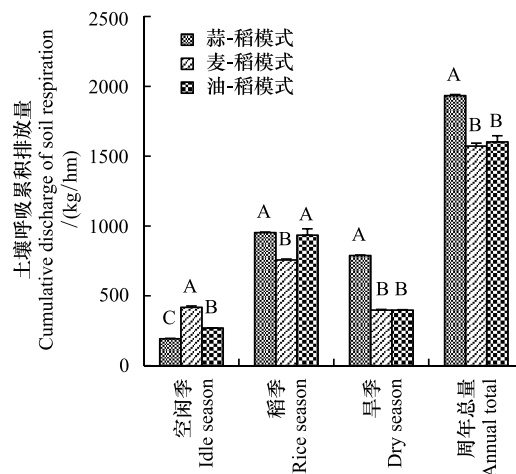


图 2 不同水旱轮作模式土壤呼吸累积排放量

Fig.2 Cumulative emission of soil respiration in different paddy-upland crop rotation system

同组中不同英文字母分别代表多重比较下在 $P < 0.01$ 水平下差异达显著水平

2.3 不同水旱轮作模式土壤呼吸速率日动态变化特征

如图 3 所示,三种模式土壤呼吸速率昼夜变化主要呈现单峰型变化,总体表现为白天高,夜晚低,具有一定波动性。各模式土壤呼吸速率在 12:00—15:00 达到最大值,其中 WR 模式在 2 月、10 月和 12 月最大值出现的时间滞后于其余两种模式;三种模式土壤呼吸速率在 2:00—6:00 出现最低值,不同季节各模式最低值出

现的时间略有差异。GR、RR 模式土壤呼吸速率日变化幅度在 6 月出现最大值,分别为 $31.11\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 和 $52.52\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$,WR 模式土壤呼吸速率日变化幅度在 8 月出现最大值,为 $28.29\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$;GR 和 RR 模式在 2 月出现日变化幅度最小值,分别为 $6.52\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 和 $3.56\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$,而 WR 模式日变化幅度最小值出现在 12 月,为 $7.63\text{mg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。GR 模式各月份土壤呼吸速率日动态波动较小,而 WR 模式和 RR 模式土壤呼吸速率日动态变化相对剧烈;WR 模式土壤呼吸速率在 2 月和 4 月的 15:00—18:00 之间分别下降 54.34% 和 58.07%;RR 模式土壤呼吸速率在 4 月和 6 月的 15:00—18:00 之间分别下降 65.21% 和 30.22%。

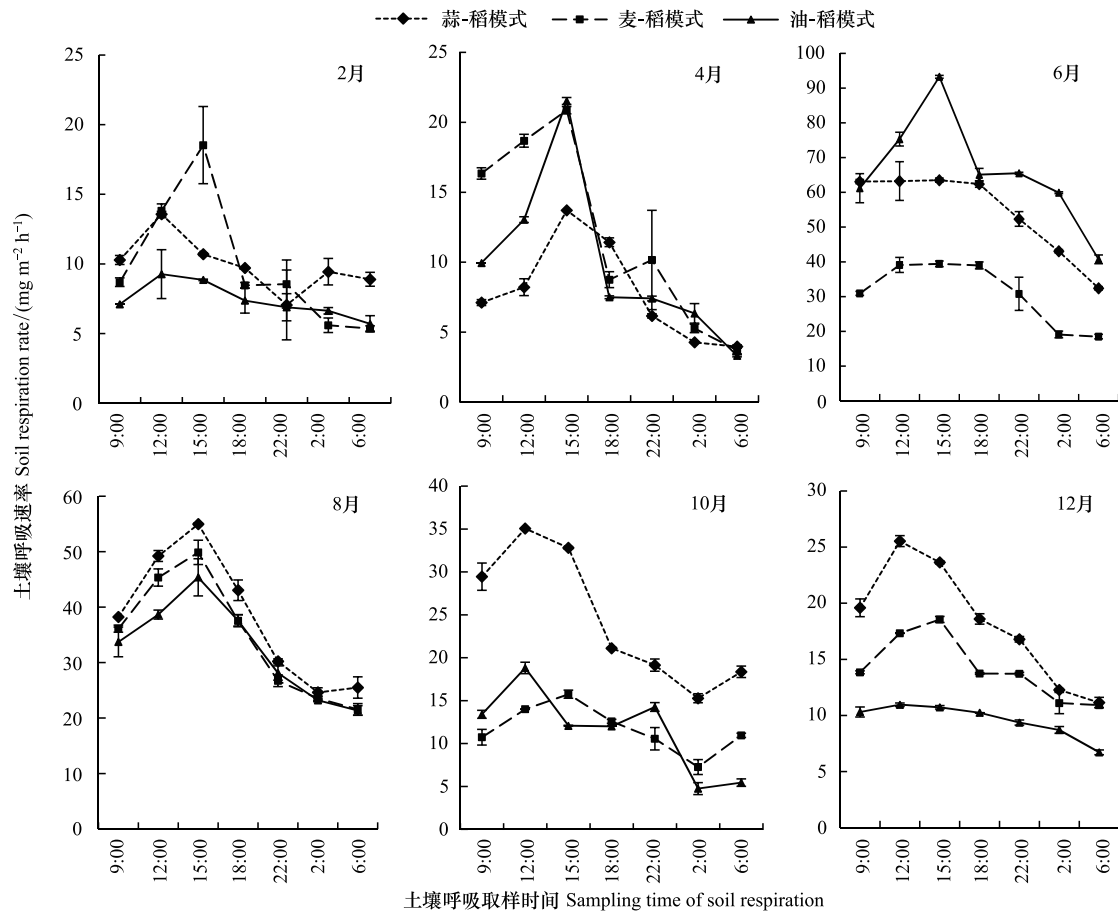


图3 不同水旱轮作模式土壤呼吸速率日动态特征

Fig.3 Daily dynamic characteristics of soil respiration rate in different paddy-upland crop rotation system

2.4 土壤呼吸速率与土壤含水量、水层高度及土壤温度的关系

通过对土壤呼吸速率与旱季土壤含水量、稻季水层高度进行回归分析,结果表明,在旱季,土壤呼吸速率与土壤含水量没有显著相关性($P>0.05$),但稻季受水层高度影响较大,其相关性达到显著水平($P<0.05$)。通过对土壤呼吸速率与土壤温度的回归分析发现,不同模式土壤呼吸速率与 0—10cm、10—20cm 土壤温度均存在极显著的相关性($P<0.01$),即土壤呼吸速率随着土壤温度的升高而增高。不同模式土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性有所差异,表现为 $\text{GR}>\text{WR}>\text{RR}$;从不同土层来看,三种模式 Q_{10} 均表现为 0—10cm>10—20cm,表明随土层的深入,土壤呼吸速率与土壤温度的敏感性逐渐减小。不同模式不同土层深度 Q_{10} 变化范围为 1.15—2.72,以 GR 模式 0—10cm 最高,RR 模式 10—20cm 最低。

3 讨论

3.1 不同水旱轮作模式对土壤呼吸速率影响

本研究结果表明,三种模式土壤周年呼吸累积排放量表现为 $\text{GR}>\text{RR}>\text{WR}$ 。研究表明^[22,23],秸秆还田能

够明显提高农田土壤碳固定,有效提高土壤有机碳及活性有机碳组分含量,而土壤有机质是微生物进行分解活动排放 CO₂ 的物质基础^[24]。前人研究表明^[25],由于“启动效应”的存在,土壤中碳的投入会导致土壤矿化的短期增加,从而导致碳流失。在本研究中,GR 模式由于旱季进行秸秆覆盖还田,增加了外源有机质的输入,提高了土壤有机碳含量,为微生物活动提供了大量底物,同时加速土壤矿化,增加了土壤呼吸速率,从而使 GR 模式土壤呼吸周年累积排放量显著高于 WR、RR 模式。此外,王春新、张庆忠^[26, 27]等研究表明,施氮量对土壤呼吸具有显著影响,在本研究中,GR 模式旱季施氮量远高于 WR、RR 模式,GR 模式旱季较高的氮投入不仅促进了大蒜地上和地下部分生物量的增加,同时残留的氮素在稻季得到利用,增加了 GR 模式稻季生物量的累积,从而间接提高了 GR 模式土壤呼吸速率,这也可能是导致 GR 模式土壤呼吸累积排放量高于其余两种模式的原因之一。

表 3 土壤呼吸速率与含水量、水层的关系

Table 3 Relationship between soil respiration rate, water content of soil and water layer						
处理 Treatment	土壤呼吸速率与含水量的关系 Relationship between soil respiration rate and water content in the soil			土壤呼吸速率与稻季水层高度的关系 Relationship between soil respiration rate and height of rice layer in rice season		
	拟合方程	R ²	n	拟合方程	R ²	n
GR	$y = 0.3058x^2 - 4.2716x + 21.48$	0.65	12	$y = -0.2853x^2 + 12.876x - 128.02$	0.65 *	7
WR	$y = -0.1664x^2 - 0.193x + 15.408$	0.65	12	$y = -0.4249x^2 + 15.276x - 121.22$	0.51 *	7
RR	$y = -0.1548x^2 + 1.0599x + 10.854$	0.6	12	$y = -0.2098x^2 + 8.155x - 68.655$	0.86 *	7

* — $P<0.05$; * — $P<0.01$

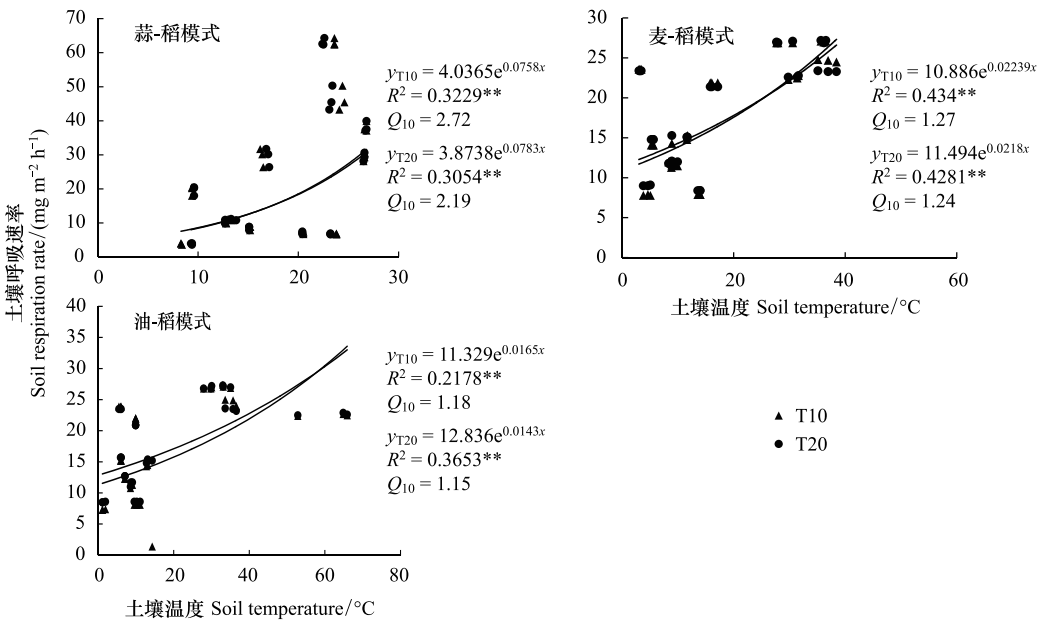


图 4 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig.4 Relationship between soil respiration rate and soil temperature

从土壤呼吸速率季节变化特征来看,水稻生长季土壤呼吸速率要显著高于其余季节。在水稻生长季中,6 月底处于水稻分蘖末期晒田阶段,植株根系生长旺盛,根际微生物活跃,土壤呼吸速率增强;此外由于没有了水层的阻隔,土壤中闭蓄态 CO₂ 得以释放^[28, 29],也使得土壤呼吸速率增大。9 月水稻收获后,田间含水量降低且不受植株遮阴影响,土壤呼吸速率又出现一个峰值。GR 模式大蒜播种后,受秸秆覆盖还田和氮肥投入影响,GR 模式土壤呼吸速率高于其余两种模式。旱季作物生长过程中,随着气温的逐渐降低,三种模式土壤呼吸速率逐渐下降,至 1 月降至最低,之后土壤呼吸速率缓慢回升。但三种模式土壤呼吸速率在 12 月份有所上

升,这可能是由于作物生育进程和地下生物量的增加从而增加了土壤微生物的活性,进而提高了土壤呼吸速率。

三种水旱轮作模式土壤呼吸日动态主要表现为单峰形式,土壤呼吸速率总体白天高于夜间,峰值出现在 12:00—15:00 之间,最低值则出现在凌晨 2:00—6:00 之间,这与高会议、韩广轩等^[30,31]研究结果一致。但 4 月 WR 模式 22:00 土壤呼吸速率高于 18:00 土壤呼吸速率,2 月 GR 模式呼吸土壤速率最低值出现在 22:00,与气温和土壤温度变化规律不一致,这与陈亮^[32]等在黄河三角洲滨海湿地的研究结果类似,这可能与温度降低后地表受霜降形成的水雾有关。GR 模式土壤呼吸速率日均值在 8 月、10 月和 12 月高于其余两种模式,这主要是由于秸秆覆盖还田增加了土壤的有机质含量,为微生物活动提供了大量底物,加速了土壤矿化,从而提高了土壤呼吸速率。此外,各模式不同季节土壤呼吸速率日动态的平均值接近 9:00 的土壤呼吸速率,与季节动态的取样时间相吻合,这与前人研究结果相一致^[33]。

3.2 土壤呼吸速率与温度、土壤含水量及水层高度的关系

土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因素之一,研究表明^[8,34],土壤温度在一定范围内增加可以提高土壤微生物活性,从而影响土壤呼吸,但当土壤温度超过一定范围,抑制了土壤微生物活性,使土壤呼吸速率降低。本研究结果表明,土壤呼吸速率与土壤温度呈指数正相关关系,这与崔海^[35]、张俊丽^[36]等研究结果一致。研究者们通常用 Q_{10} 来表示土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系,前人研究结果表明^[37], Q_{10} 值变化范围一般在 1.3—3.3 之间。在本研究中,三种模式 Q_{10} 值变化范围在 1.15—2.72 之间,与 Raich^[37]等的研究结果类似。不同模式间,GR 模式 Q_{10} 值最高,表明 GR 模式土壤呼吸速率与土壤温度敏感性最高,这可能是与 GR 模式采用秸秆覆盖还田有关。

土壤含水量是除土壤温度外,影响土壤呼吸速率的又一关键因素。土壤含水量通过调节土壤通气状况,影响微生物活性以及调节土壤氧化还原状况来调节土壤呼吸;土壤水分变化对温度的影响(通过水分有效性驱动的感热通量和潜热通量的变化)也间接影响土壤呼吸。在本研究旱季作物生长过程中,土壤呼吸速率与土壤含水量没有显著相关性,GR、WR、RR 模式分别在含水量达到 22.57%、17.98%、19.44%时,各模式土壤呼吸速率达到最大值。土壤含水量对土壤呼吸的影响十分复杂,往往同时受与土壤温度的协调情况影响,目前关于土壤含水量与土壤呼吸速率关系的研究尚没有定论。多数研究者认为,土壤含水量在一定范围时,随着土壤含水量的增加,土壤呼吸速率相应上升,当土壤含水量超出这个范围时,则会抑制土壤呼吸速率。王雪^[38]等研究表明,土壤水分与土壤呼吸速率呈倒“U”型相关关系,即土壤水分含量较低时,土壤水分的增加可以促进土壤呼吸作用,但土壤含水量达到一定程度后,土壤水分的增加则抑制土壤呼吸作用,这可能是由于土壤在干旱阶段,微生物活动由于受到水分的限制;而在土壤处于湿润阶段时,有机物的分解过程从好氧转变为厌氧,而厌氧分解速率仅为好氧分解速率的 30—40%^[39]。丁新宇^[40]等研究指出,在不同土壤条件下,土壤含水量呈现完全相反的相关性,在干旱阶段,土壤呼吸速率与土壤含水量正相关,但在湿润阶段土壤呼吸速率与土壤含水量则呈负相关。

在水稻生长季,淹水状态下土壤呼吸速率受水层深度制约^[41]。本研究结果表明,土壤呼吸速率与稻田水层高度呈显著负相关,这与武文明^[28]等在西双版纳地区的研究结果一致。由于水层的存在,土壤呼吸受到阻隔,同时水层能够溶解部分 CO_2 ;此外,水层深度的变化还会影响土壤温度、有机质分解、微生物活性和土壤动物的数量等其他因子,进而影响土壤呼吸速率。因此水层深度对土壤呼吸的影响还具有不确定性和复杂性^[42]。

研究表明^[43],土壤温度和含水量的协同作用能够更好地解释土壤呼吸变化情况,解释能力高于 50%,一般比单一因子的解释能力更强,但由于农田生态系统复杂的环境因子,目前水热因子同土壤呼吸之间的关系仍然难以定量描述。

4 结论

通过对川西平原灌区三种不同水旱轮作模式的土壤呼吸特征及其水热影响因素研究,结果表明,土壤呼

吸周年累积排放量以 GR 模式最高,从不同作物生长季来看,稻季>旱季>空闲季。土壤呼吸速率季节动态呈双峰曲线,在 6 月和 9 月达到峰值。土壤呼吸速率日动态呈单峰曲线,土壤呼吸速率在 12:00—15:00 间出现最大值,在 2:00—6:00 之间出现最低值。三种模式土壤呼吸速率与 0—10cm 和 10—20cm 土壤温度呈指数正相关且对温度变化敏感, Q_{10} 值变化范围在 1.15—2.72 之间。不同模式间相比,GR 模式 Q_{10} 值最高,土壤呼吸速率与土壤温度敏感性最高。三种模式土壤呼吸与土壤水分没有显著相关性,但稻季与水层高度表现为显著负相关。然而,水热生态因子对水旱轮作土壤呼吸的影响是一个十分复杂的过程,既会直接影响土壤呼吸的排放,也会通过改变土壤微生物区系组成、外源碳的进入量等间接影响土壤呼吸,其作用机制还需要进一步论证研究。总体来看,川西平原灌区水旱轮作栽培管理过程中,应注意控制蒜-稻轮作模式的氮肥投入,稻季合理管理田间水层,从而有效管理土壤呼吸碳排放。

参考文献 (References):

- [1] 蔡金云, 孙文娟, 丁凡, 胡洵瑀, 陈越, 黄耀. 两种农田土壤不同组分呼吸及其温度敏感性. 应用生态学报, 2016, 26(9): 2655-2662.
- [2] 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.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [4] 张涛, 李永夫, 姜培坤, 周国模, 刘娟. 土地利用变化影响土壤碳库特征与土壤呼吸研究综述. 浙江农林大学学报, 2013, 30(3): 428-437.
- [5] 周萍, 刘国彬, 薛蕊. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展. 草业学报, 2009, 18(2): 184-193.
- [6] 李长生, 肖向明, Froking S, Moore III B, Salas W, 邱建军, 张宇, 庄亚辉, 王效科, 戴昭华, 刘纪远, 秦小光, 廖柏寒, Sass R. 中国农田的温室气体排放. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493-503.
- [7] 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, 28(3): 65-67.
- [8] 吴瑞娟, 王迎春, 朱平, 贺美, 黄诚诚, 王立刚, 张凤路. 长期施肥对东北中部春玉米农田土壤呼吸的影响. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 44-52.
- [9] 张莉, 王婧, 逢焕成, 张珺瑾, 郭建军, 董国豪. 短期秸秆颗粒还田对小麦-玉米系统作物产量与土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2018, 29(2): 565-572.
- [10] 郝雅星, 张立峰, 韩凯虹, 王伟婧. 不同耕作方式下草甸栗钙土燕麦田土壤微生物特征. 生态学报, 2016, 36(5): 1462-1470.
- [11] Cheng W X, Kuzyakov Y. Root effects on soil organic matter decomposition//Zobel R W, Wright S F, eds. Roots and Soil Management: Interactions Between Roots and the Soil. Agronomy Monograph No. 48. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005: 119-143.
- [12] 张前兵, 杨玲, 王进, 罗宏海, 张亚黎, 张旺锋. 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. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2420-2430.
- [13] Haines A. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. International Journal of Epidemiology, 2003, 32(2): 321-323.
- [14] Zhou W, Lv T F, Yang Z P, Wang T, Fu Y, Chen Y, Hu B H, Ren W Jet al. Morphophysiological mechanism of rice yield increase in response to optimized nitrogen management. Scientific Reports, 2017, 7: 17226.
- [15] 范明生, 江荣风, 张福锁, 吕世华, 刘学军. 水旱轮作系统作物养分管理策略. 应用生态学报, 2008, 19(2): 424-432.
- [16] Yu C Q, Wang J W, Shen Z X, Fu G. Effects of experimental warming and increased precipitation on soil respiration in an alpine meadow in the Northern Tibetan Plateau. Science of the Total Environment, 2019, 647: 1490-1497.
- [17] 王家骏, 王传宽, 韩轶. 帽儿山不同年龄森林土壤呼吸速率的影响因子. 生态学报, 2018, 38(4): 1194-1202.
- [18] 王维钰, 乔博, Akhtar K, 袁率, 任广鑫, 冯永忠. 免耕条件下秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2136-2152.
- [19] 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜. 水稻根系生物特性与稻田温室气体排放相关性研究. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2416-2421.
- [20] 金涛. 施氮对几种旱地土壤呼吸和红壤性稻田碳排放的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [21] 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.
- [22] 张鹏鹏, 濮晓珍, 张旺锋. 干旱区绿洲农田不同种植模式和秸秆管理下土壤质量评价. 应用生态学报, 2018, 29(3): 839-849.
- [23] 张岳芳, 陈留根, 朱普平, 张传胜, 盛婧, 王子臣, 郑建初. 秸秆还田对稻麦两熟高产农田净增温潜势影响的初步研究. 农业环境科学学

- 报, 2012, 31(8): 1647-1653.
- [24] Bazzaz F A, Williams W E. Atmospheric CO₂ concentrations within a mixed forest: implications for seedling growth. *Ecology*, 1991, 72(1): 12-16.
- [25] Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, Pett-Ridge J, Weber P K, Kleber M. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 588-595.
- [26] 王春新, 于鹏, 张玉玲, 范庆锋, 虞娜, 邹洪涛, 张玉龙. 氮肥与有机肥配施对设施土壤呼吸的影响. *土壤通报*, 2017, 48(1): 146-154.
- [27] 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.
- [28] 武文明, 杨光明, 沙丽清. 西双版纳地区稻田 CO₂ 排放通量. *生态学报*, 2009, 29(9): 4983-4992.
- [29] Miyata A, Leuning R, Denmead O T, Kim J, Harazono Y. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102(4): 287-303.
- [30] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态. *生态学报*, 2009, 29(5): 2551-2559.
- [31] 韩广轩, 朱波, 江长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 450-456.
- [32] 陈亮, 刘子亭, 韩广轩, 初小静, 孙宝玉, 刘海防, 李建文. 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. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1795-1803.
- [33] 秦璐, 吕光辉, 何学敏, 杨建军, 何静, 张燕. 艾比湖西区土壤呼吸测定代表性时段. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 3109-3116.
- [34] 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): 2919-2924.
- [35] 崔海, 张亚红. 干旱区荒漠草原土壤呼吸速率日动态特征及影响因子. *核农学报*, 2016, 30(8): 1614-1624.
- [36] 张俊丽, 廖允成, 曾爱, 刘杨, 林杰, 王永平. 不同施氮水平下旱作玉米田土壤呼吸速率与土壤水热关系. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1382-1388.
- [37] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [38] 王雪, 李景, 汪俊玉, 刘东阳, 武雪萍, 李晓秀, 席吉龙, 李永山, 张建诚, 杨娜, 郝佳丽. 免耕施肥条件下冬小麦季土壤呼吸速率及影响因素. *中国土壤与肥料*, 2017, (3): 105-110.
- [39] Wania R, Ross I, Prentice I C. Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 2. Evaluation and sensitivity of vegetation and carbon cycle processes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(3): GB3015.
- [40] 丁新宇, 王自奎, 杨轩, 杜珊珊, 沈禹颖. 保护性耕作对旱作农田干湿交替过程中土壤呼吸速率的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(24): 4759-4768.
- [41] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 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.
- [42] 汤宏. 秸秆还田下稻田温室气体排放及其对水分管理的响应[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [43] 涂志华, 庞卓, 赵阳, 郑力文, 余新晓, 陈丽华. 北京西山侧柏人工林土壤呼吸组分及其影响因素. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2948-2956.