

西藏玉米田养鹅模式下的土壤碳排放特征

杨红¹, 柳文杰¹, 刘合满², 曹丽花²

(1. 西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 2. 信阳农林学院, 河南 信阳 464000)

摘要:为探究玉米田养鹅模式(RGC)对高寒农田土壤碳排放的影响,以藏东南玉米田养鹅模式下高寒农田为研究对象,采用开路式土壤碳通量测定系统进行实地测定。结果表明:土壤温度、体积含水量和碳排放速率均表现为“单峰型”日变化特征,但在峰值和谷值出现时间上存在差异,即土壤呼吸速率滞后于土壤温度和含水量的变化;整个生育期内,土壤碳排放速率均表现为RGC>CK,说明玉米田养鹅模式可有效提高土壤碳排放效率,但从空间变异性(变异系数CK>RGC)和温度敏感性系数(Q_{10} 值表现为CK(1.19~1.38)>RGC(1.12~1.30))来看,玉米田养鹅生产模式可有效提高土壤呼吸抵抗外界干扰的能力和降低高寒区域农田土壤温度敏感性;双变量拟合模型显示,土壤呼吸速率的日变化极显著响应于土壤温度与体积含水量的协同变化($0.862 < R^2 < 0.981$),但不同测定日期的响应程度存在差异;土壤呼吸速率表现为RGC>CK,但变异系数表现为CK>RGC,说明CK的土壤呼吸更容易受到外界环境变化的影响。因此,高寒区域农田玉米田养鹅模式有利于提高土壤肥力、增加土壤碳稳定性、降低土壤碳排放速率温度敏感性。

关键词:玉米田养鹅;土壤呼吸;土壤温度;体积含水量;土壤碳排放特征

中图分类号:S151.9 **文献标志码:**A

Characteristics of soil carbon emission under the model of raising geese in corn field in Tibet

YANG Hong¹, LIU Wenjie¹, LIU Heman², CAO Lihua²

(1. Resources & Environment College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi, Tibet 860000, China;

2. College of Agronomy, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: To explore the effect of raising geese in corn field production model on soil respiration rate of alpine farmland, our study applied an experiment to compare the difference of soil respiration rates under two treatments of raising geese in corn field (RGC) and conventional maize planting (CK) in the alpine farmland of southeast Tibet. The open circuit soil carbon flux measurement system was used for field measurement. The results showed: (1) An asymmetric “single peak” trend was found for the diurnal variation of soil temperature, soil volumetric moisture content and soil respiration rate probably due to hysteresis of respiration rate. (2) During the whole growth period, the soil respiration rate showed the order of RGC > CK, meaning integration of agriculture and animal husbandry could effectively improve the efficiency of soil carbon emission. However, based on the spatial variability (coefficient of variation: CK > RGC) and temperature sensitivity coefficient (Q_{10} value: CK (1.19~1.38) > RGC (1.12~1.30)), the production model of “raising geese in corn field” could effectively improve soil respiration and resist external drought ability of disturbance and reduction of soil temperature sensitivity in alpine region. (3) The bivariate model fitted by soil temperature and soil volume moisture explained 0.862~0.981 of the daily variation of soil respiration rate, indicating the change of soil respiration rate was very significantly response to the synergistic

收稿日期:2021-04-29

修回日期:2021-07-28

基金项目:西藏农牧学院林学创新团队建设项目(藏财预支 2020-11-13);西藏农牧学院厅校联合基金(76660026);林芝农业科技园区花卉景观设计与应用(603320005);西藏农牧学院雪域英才项目(2015XYD06);林芝农业科技园区花卉景观设计与应用(一期)(603320005)

作者简介:杨红(1991-),男,甘肃卓尼人,硕士研究生,讲师,研究方向为高原土壤养分循环。E-mail:hyang2016@163.com

通信作者:刘合满(1974-),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事高原土壤物质循环与环境效应研究。E-mail:liuh-m@163.com

change of soil temperature and soil volume moisture, but the response degree of different measurement dates was different. (4) For the two treatments, the soil respiration rate was $RGC > CK$, but the coefficient of variation was $CK > RGC$, meaning the soil respiration of CK was more easily changed by the changes of external environment. It is beneficial to improve soil fertility and soil carbon stability and reduce soil respiration rate temperature sensitivity in the alpine region.

Keywords: Raising geese in corn field; soil respiration; soil temperature; volume water content; characteristics of soil carbon emission

土壤呼吸作为大气 CO_2 浓度升高的主要因素,所指为土壤中产生 CO_2 的所有代谢过程,包括土壤生物(动物、植物、微生物等)在生命活动过程中所进行的呼吸作用以及土壤有机碳矿化分解等作用产生的 CO_2 ,是陆地生态系统土壤碳排放的主要途径^[1]。土壤呼吸每年的 CO_2 排放量是全球化石燃料排放量的 10 倍^[2]。在全球气候变化背景下,土壤呼吸碳排放量可能会进一步增加,西藏作为全球气候变化的敏感区,在本世纪中叶增温幅度可达到 $2.4^\circ C \sim 3.2^\circ C$ ^[3],这将激发青藏高原敏感区土壤温室气体的排放,从而加速全球变暖。

农田生态系统作为受人为干预和支配较为频繁的半自然陆地生态系统,农耕方式、水肥管理措施及作物种类均可通过改变土壤的结构、质地及肥力等因素,影响土壤碳排放强度^[4]。西藏农田主要集中在“一江两河”流域,是西藏人民赖以生存的主要粮食来源,然而,由于气候恶劣、土壤贫瘠等原因,施肥成了提高作物产量的主要措施,施肥的残留物质,通过淋溶污染地下水,产生的氮氧化物增加大气温室气体浓度,而这可能是导致青藏高原脆弱生态环境被破坏的“致命一击”。更值得注意的是随着全球气候变化的进一步加剧,青藏高原作为气候变化的敏感区,农田土壤碳排放将积极响应于这一变化。

玉米田养鹅(Raising geese in corn field, RGC)是遵循生态学原理,在同一块土地内同时进行种养结合的一种可持续农业生产模式,这种模式可有效提高农业经济收入^[5]、维持农田生态系统多样性^[6]和杂草防控^[7]。然而,“玉米田养鹅”模式在提高农业经济效益的条件下,对土壤碳排放的影响如何尚鲜见报道,从而制约对玉米田养鹅模式生态经济效益的有效评估。青藏高原高寒农田生态系统十分脆弱,正在经历着明显的气候变暖,因此,研究青藏高原玉米田养鹅模式下高寒农田生态系统土壤碳排放,对预测未来大气 CO_2 浓度、改变传统农业措施造成的面源污染及有效评价玉米田养鹅模式的利弊具有重大意义。故本研究以西藏高寒区域玉米田养鹅农业生产模式下的农田土壤为研究对象,分

析玉米田养鹅对土壤呼吸速率的影响,以期科学阐明高寒气候条件下玉米田养鹅模式的固碳效应和为研究青藏高原高寒农田生态系统土壤呼吸速率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于藏东南林芝市巴宜区八一镇章麦村, $29^\circ 33' N, 94^\circ 21' E$, 海拔 3 100 m, 全年均温 $8.6^\circ C \sim 8.8^\circ C$, 7 月(当地最热月)均温可达 $18^\circ C$; $\geq 10^\circ C$ 的年有效积温 $2\ 225.7^\circ C$, 年平均降雨量 634.2 mm, 降水主要集中在 5~9 月, 占全年降水的 79.1%, 年日照时数 1 988.6 h 左右, 年总辐射量为 $6.1 \times 10^9 \sim 7.0 \times 10^9 J \cdot m^{-2}$, 光合有效辐射为 $2.5 \times 10^9 \sim 3.0 \times 10^9 J \cdot m^{-2}$, 无霜期 177 d。试验地为高寒农田, 无遮阴, 土壤类型为沙质土, 沙粒含量较多。试验地的耕作制度为油菜—冬小麦或油菜—春青稞轮作。2012 年种植青稞, 于 2013 年开始长期定位试验。

1.2 试验设计

于 2013 年 5 月 9 日试验组进行玉米播种, 所播玉米品种为酒单 4 号, 玉米株、行间间隔分别为 30 cm 和 70 cm, 设置保护行。底肥施用复合肥(组成: $N33\%, P_2O_5 17\%, K_2O 17\%$, 有机质 20%), 用量为 $240 kg \cdot hm^{-2}$ 。设置玉米田养鹅(RGC)和常规玉米种植(CK), 重复 3 次, 每个试验小区 $20 m^2$, 总面积为 $120 m^2$, 随机排列, 各小区之间间隔 1 m, 养鹅处理的农田不除杂草, 各小区用 0.5 m 高的网围住。综合考量小区内杂草的持续供应性和玉米的正常生长, 3 个试验处理小区的养鹅总数量为 10 只, 并在 3 个小区内轮换放牧, 每个小区方放牧时间相等。于 8:00 左右放入试验地, 确保鹅的饮水供应充足, 19:00 左右收回鹅圈, 并一次性投加饲料 1 kg。对照使用除草剂玉雕(成分: 锈去津, 含量: 90%; 硝磺草酮, 含量: 10%)来进行杂草管理, 施用量为 $1.65 kg \cdot hm^{-2}$, 利用背式喷雾器进行近地面喷施, 共喷施 2 次(第 1 次在播种后, 第 2 次与第 1 次间隔 50 d)。除此之外, RGC 和 CK 的其他管理措施相同。2013

年开始试验至 2017 年期间处理相同。本试验数据
采集于 2017 年 5—8 月。

1.3 测定项目及方法

采用开路式土壤碳通量测定系统(Li-8100,Li-COR,USA)进行土壤呼吸速率的测定,为降低土壤
表面植物生理活动对土壤呼吸速率的影响,测量前
24 h 在每个小区玉米行间随机选择 3 个样点,并安
装直径为 20 cm,高 10 cm 的土壤环(呈对角线安
装),将土壤环高度的 2/3 插入土壤,环内的植物齐
地面剪除。于 2017 年 5 月 29—31 日、6 月 12—14
日、6 月 28—30 日、7 月 16—18 日、7 月 28—29 日、8
月 6—8 日进行土壤呼吸速率及 10 cm 土壤深度
的温度、5 cm 深度的体积含水量测定;仪器测定时
间步长设为 3 min,土壤呼吸、体积含水量和温度
的变化取该时段内 20 次(1 h)测定值的平均数,并
将 24 h 的指标变化作为日变化特征进行统计。

土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量测定分别
采用重铬酸钾-外加热法、半微量开氏法、HClO₄-
H₂SO₄法和 NaOH 熔融—火焰光度法。土壤速效
氮、速效磷、速效钾含量测定分别采用碱解扩散
法、0.5 mol·L⁻¹碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法、
NH₄OAc浸提—火焰光度法,土壤 pH 值测定采
用 5:1 水土比,即搅拌 1 min,静置 30 min 后,采
用 pH 测定仪(IQ150,美国 IQ 公司)进行测定,采
用土壤紧实度仪(SC900)测量土壤紧实度。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 进行数据处理,处理间土壤呼
吸、土壤温度和土壤体积含水量之间的差异分析
采用单因素方差分析(One-way ANOVA)法,CK 与
RGC 处理土壤呼吸之间的差异分析采用配对样
本 *T* 检验。作图及相关性分析采用 Origin 9.0(Originlab
公司,美国)进行。

土壤呼吸温度敏感性 *Q*₁₀ 值采用指数模型拟
合,计算公式为:

$$R_s = ae^{bT}$$
(1)

$$Q_{10} = e^{10b}$$
(2)

式中,*R*_s 为土壤呼吸速率,*T* 为土壤温度,*a* 是当土壤
温度为 0℃ 时的土壤呼吸速率,*b* 为温度反应系数,
*Q*₁₀ 为土壤呼吸温度敏感性系数。

2 结果与分析

2.1 玉米田养鹅模式下土壤理化性质的变化特征

由表 1 可知,较试验农田初建时的养分状况,经
过 5 a 试验后,RGC 处理和 CK 处理的土壤 pH 值均
有所降低,但 RGC 处理降低趋势较 CK 显著(*P*<
0.05)。有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、紧
实度和土壤容重均表现为 RGC>CK。

2.2 玉米田养鹅模式下土壤呼吸日变化动态

由图 1 可知,CK 土壤呼吸速率日变化特征呈
“单峰型”变化态势,其中幼苗期、拔节期、抽雄期、
开花期、吐丝期和成熟期土壤呼吸速率分别分布在
0.59~1.86、0.69~2.40、1.02~2.79、1.28~2.50、1.92~
3.14 μmol·m⁻²·s⁻¹和 1.09~2.83 μmol·m⁻²·s⁻¹,
各生长期最大值分别出现在 16:00、16:00、
17:00、19:00、18:00 和 17:00。幼苗期、抽雄期
和吐丝期最小值出现时段一致,在 06:00—
07:00,拔节期和开花期最小值出现时段一致,在
07:00—08:00,成熟期最小值出现在 06:00。
RGC 处理幼苗期、拔节期、抽雄期、开花期、吐丝
期和成熟期土壤呼吸速率分别在 1.34~2.40、1.75~
3.54、2.26~3.20、2.65~4.33、2.39~4.21 μmol·m⁻²
·s⁻¹和 2.38~4.13 μmol·m⁻²·s⁻¹,日变化趋势与
CK 一致,但极值出现时间存在差异。

2.3 玉米田养鹅模式下不同生长期土壤呼吸变化特征

由图 2 可知,随着生长期的推进,RGC 和 CK 土
壤呼吸速率均呈先增加后降低的变化趋势,即从幼

表 1 耕层土壤理化化学性质
Table 1 Physical and chemical properties of topsoil

处理 Treatment	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali hydrolyzed nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	pH 值 pH value	紧实度 Compactness /Pa	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)
初建 Initial construction	14.50±2.33b	0.77±0.14b	78.56±9.63a	98.81±12.33a	126.69±10.23b	6.86±0.56a	48.57±5.39b	1.21±0.17b
RGC	25.73±3.68a	1.25±0.09a	84.62±18.37a	103.98±17.65a	142.07±16.98a	6.03±0.22a	96.73±12.81a	1.42±0.09a
CK	13.56±1.62b	1.03±0.13a	76.35±15.81a	95.25±21.84a	113.84±25.37 b	6.52±0.41b	51.62±8.34b	1.36±0.12b

注:不同小写字母表示差异显著(*P*<0.05)。
Note: Different lowercase letters are significant difference (*P*<0.05).

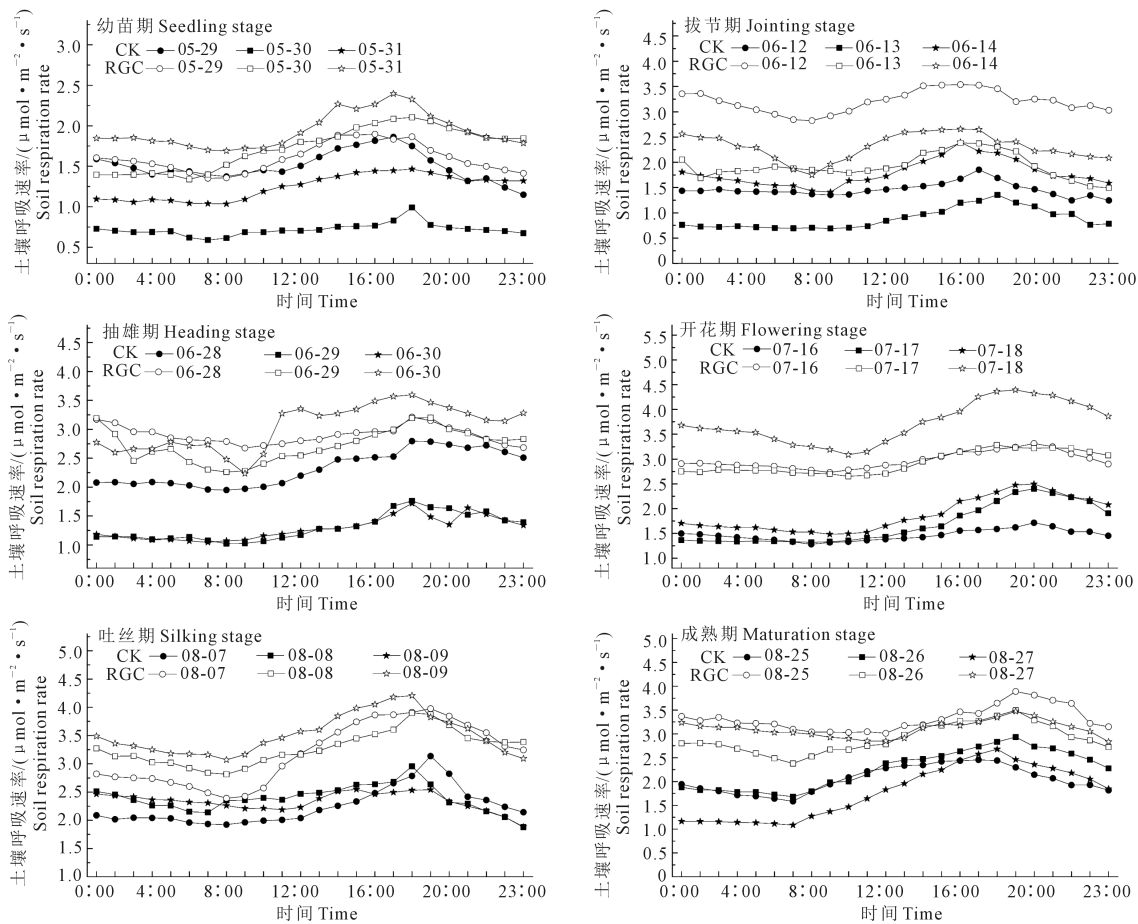
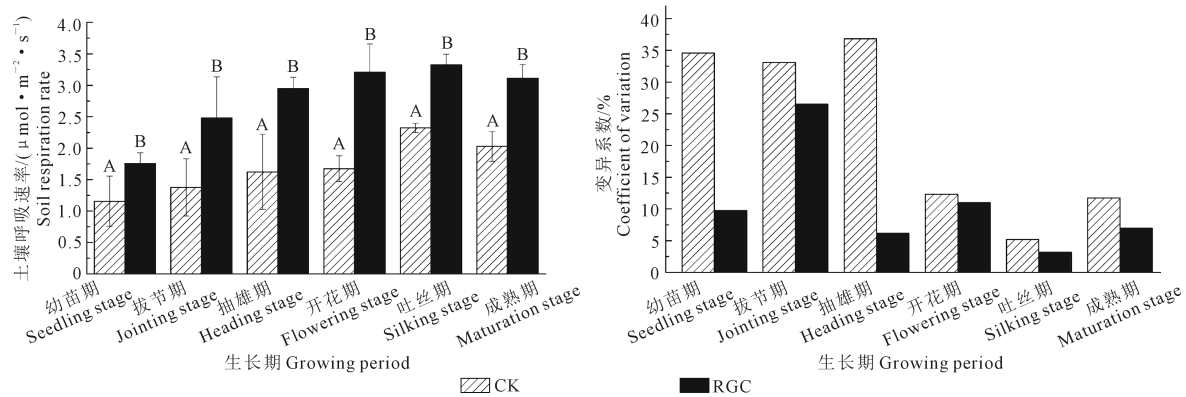


图 1 不同处理下土壤呼吸速率日变化动态
Fig.1 Diurnal variation of soil respiration rate under different treatments



注:不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)。
Note: Different capital letters are extremely significant difference ($P<0.01$).

图 2 不同处理下不同生长期土壤呼吸速率变化特征

Fig.2 Variation characteristics of soil respiration rate in different growth periods under different treatments

苗期 (RGC, $1.75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CK, $1.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,下同)开始,土壤呼吸速率逐渐增加,直至吐丝期 (RGC, $3.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CK, $2.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)达到最大,随后开始降低,至成熟期时, RGC 和 CK 土壤呼吸速率分别为 $3.11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.03 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从幼苗期至成熟期,土壤呼吸速率均表现为

RGC>CK, RGC 较 CK 分别高出 51.74%、80.02%、81.61%、91.84%、43.19%和 53.46%。在幼苗期至成熟期, RGC 变异系数介于 5.17%~26.48%, CK 变异系数分布在 3.16%~36.81%,各生长期均表现为 CK >RGC,说明 CK 处理土壤呼吸更容易受到外界环境变化的干扰。

2.4 玉米田养鹅模式下土壤温度、体积含水量变化特征

2.4.1 土壤温度 由图 3 可知,从幼苗期至成熟期,RGC 土壤温度变化范围分别为 9.33~27.24、11.65~23.33、12.66~24.13、11.84~25.87、13.43~29.01、13.17~28.84℃,CK 土壤温度变化范围分别为 9.97~26.64、11.24~27.01、12.67~23.62、11.98~24.08、13.38~31.92、13.14~31.85℃,呈单峰型日变化特征。土壤温度快速升温期主要在 07:00—15:00,快速降温主要在 16:00—19:00。将幼苗期至成熟期土壤温度平均,土壤平均温度均表现为 CK>RGC,且 CK 较 RGC 分别高出了 2.58%、3.83%、0.41%、2.60%、0.64%和 3.07%。

2.4.2 土壤体积含水量 由图 4 可知,土壤体积含水量呈单峰型日变化态势。在 6 个生长期, RGC 处理土壤体积含水量变化范围分别在 0.15~0.29、0.14~0.25、0.19~0.26、0.19~0.27、0.16~0.26 m³·m⁻³和 0.17~0.26 m³·m⁻³;CK 土壤体积含水量变化范围分别在 0.15~0.23、0.13~0.23、0.18~0.28、0.17~0.29、0.19~0.27 m³·m⁻³和 0.17~0.27 m³·m⁻³。各

生长期土壤体积含水量最大值一般出现在 06:00—07:00,最小值一般出现在 14:00—17:00。平均而言,整个生育期内土壤平均体积含水量均表现为 RGC>CK,幼苗期至成熟期,RGC 分别较 CK 高出了 6.41%、3.34%、0.79%、2.67%、3.04%和 1.81%。

2.5 玉米田养鹅模式下土壤呼吸对温度和体积含水量的响应

2.5.1 土壤呼吸对温度的响应 土壤温度与土壤呼吸速率二者之间的对应关系呈近椭圆形分布特征,由图 5 可知,土壤温度与土壤呼吸速率二者并不是保持同步变化,而是在温度变化幅度大的一段时间内,土壤呼吸速率变化明显滞后于温度变化。处理 RGC 的幼苗期,土壤温度最小和最大值分别出现在 05:00 和 15:00,而土壤呼吸速率最小和最大值出现在 06:00 和 16:00,可见,土壤呼吸速率滞后于土壤温度变化 1 h;CK 处理土壤温度最小值和最大值出现时间分别为 06:00 和 15:00,而土壤呼吸最大值和最小值分别滞后于土壤温度变化 1 h 和 2 h。其他各生长期两者的变化特征与幼苗期相似,均存在土壤呼吸滞后现象。

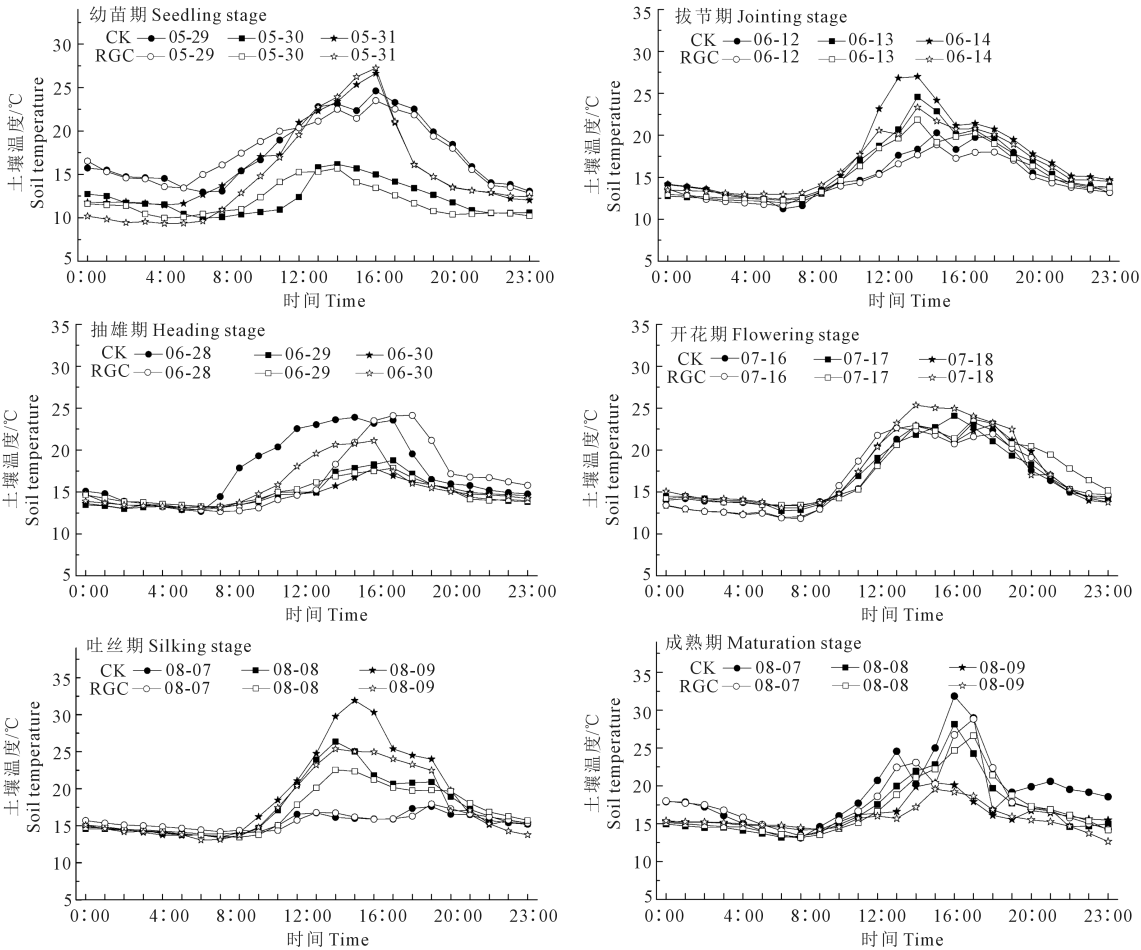


图 3 不同处理下土壤温度日变化特征

Fig.3 Diurnal variation characteristics of soil temperature under different treatments

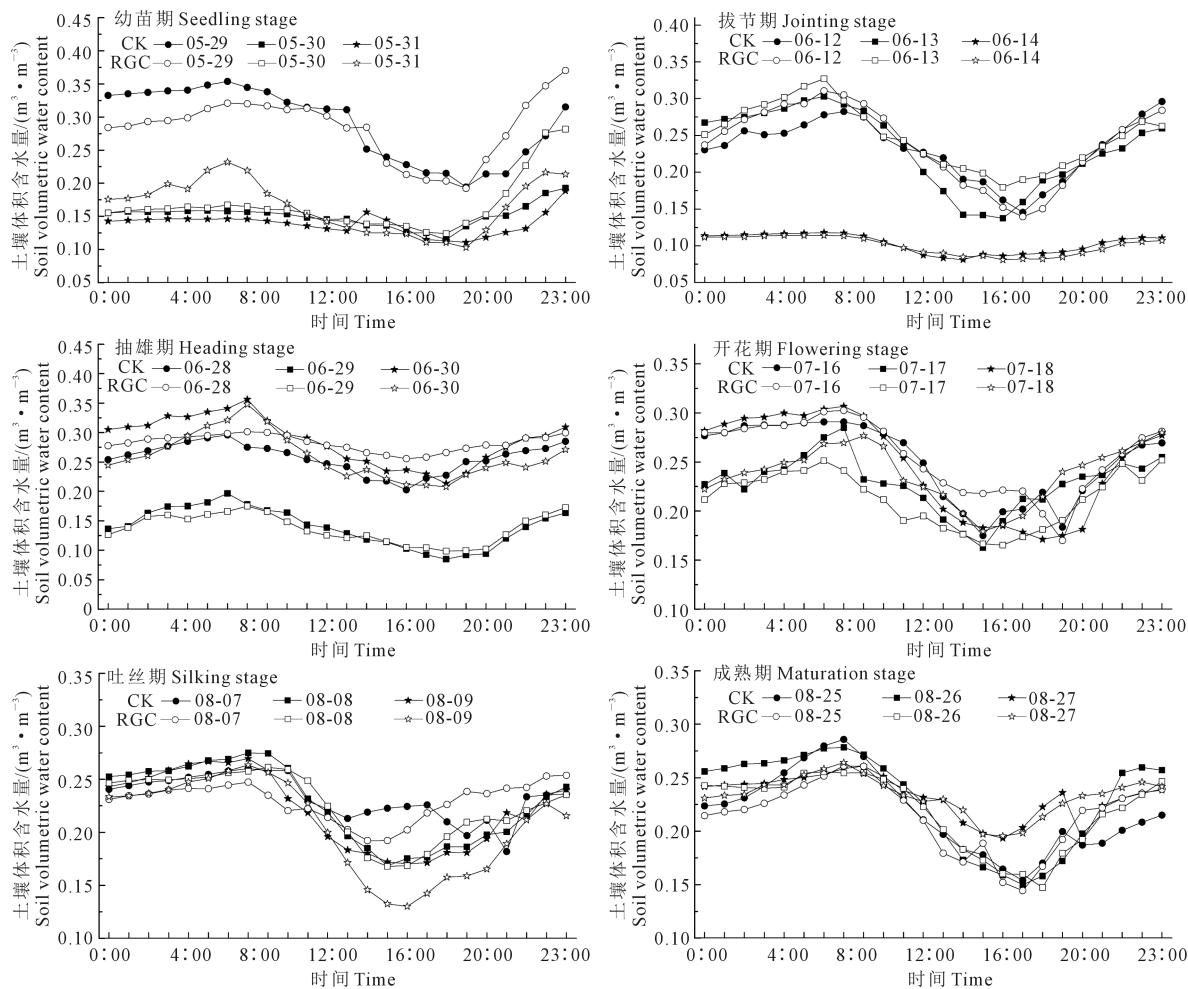


图 4 不同处理下土壤体积含水量变化特征

Fig.4 Variation characteristics of soil volume moisture content under different treatments

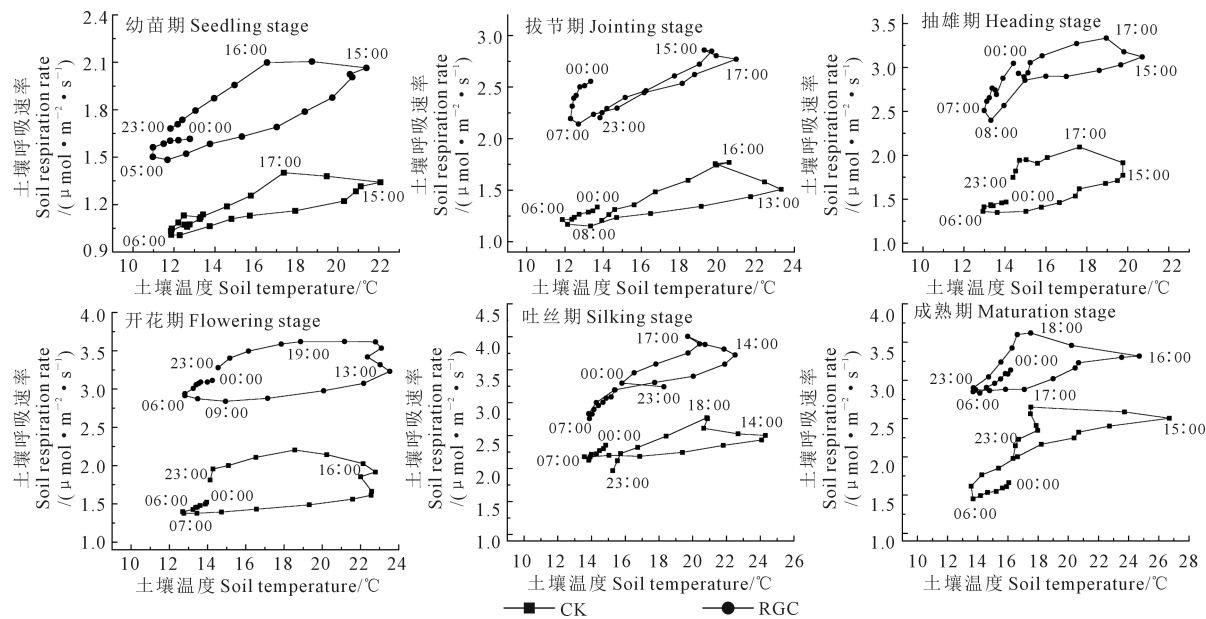


图 5 不同处理下土壤呼吸速率对温度的响应

Fig.5 Response of soil respiration rate to temperature under different treatments

2.5.2 土壤呼吸对土壤体积含水量的响应 土壤呼吸速率与土壤体积含水量的关系同样呈近椭圆形分布特征(图 6),表现为随土壤体积含水量的增加土壤呼吸速率呈降低的趋势。RGC 处理幼苗期、拔节期、抽雄期、开花期、吐丝期和成熟期的土壤呼吸速率最小值滞后于土壤体积含水量变化 0、1、1、3、0 h 和 0 h,土壤呼吸速率最大值分别滞后于体积含水量变化 1、0、0、3、2 h 和 1 h。CK 幼苗期至成熟期,在最小值出现时间上土壤呼吸速率分别滞后于土壤体积含水量变化 0、1、0、1、1 h 和 -1 h,在最大值出现时间上土壤呼吸速率分别滞后于土壤体积含水量变化 0、1、0、4、4 h 和 1 h。

2.5.3 土壤呼吸速率与土壤温度、体积含水量的复合关系 土壤呼吸速率的变化并非受单一因子的影响,而是受多种因素的共同作用,其中,土壤温度和土壤体积含水量的影响尤为重要^[11],且关系复杂。诸多研究者在进行回归分析时选择的关系拟合模型差异较大,笔者采用双变量回归模型 $y=at+bw+k$ (y 为土壤呼吸速率, t 为土壤温度, w 为土壤体积含水量)对土壤呼吸速率与土壤温度及体积含水量的关系进行回归分析,结果见表 2。CK 幼苗期至成熟期,土壤呼吸速率与土壤温度及体积含水量之间均达到了极显著相关水平($P<0.01$),土壤温度和土壤体积含水量两者拟合的双变量模型可共同解释土壤呼吸速率日变化的 86.21%~98.12%;RGC 处理幼苗期至成熟期,土壤呼吸速率与土壤温度及体积含水量之间亦均达到了极显著相关水平($P<$

0.01),土壤温度和体积含水量两者拟合的双变量模型可共同解释土壤呼吸速率日变化的 58.32%~96.51%。相对于 RGC 处理,CK 的土壤呼吸速率整体上更容易受到土壤温度和体积含水量变化的影响。可见,玉米田养鹅可能会通过提高土壤碳库的稳定性,从而降低土壤呼吸对外界环境温湿度变化的响应程度。

土壤有机碳分解的温度敏感性(Q_{10})是指土壤温度每上升 10℃,土壤有机碳分解速率所增加的倍数。 Q_{10} 值越大,表明土壤有机碳分解对温度变化越敏感^[8]。本研究中,各生长期 CK 温度敏感性系数 Q_{10} 值分布在 1.19~1.38,平均值为 1.33;各生长期 RGC 温度敏感性系数 Q_{10} 值分布在 1.12~1.30,平均值为 1.25,温度敏感性系数 Q_{10} 值整体表现为:CK>RGC。其原因可能是鹅粪进入土壤改善了土壤结构,提高了土壤团聚体的稳定性,对土壤有机碳起到了保护作用,从而降低了土壤有机碳分解的温度敏感性。

3 讨 论

3.1 玉米田养鹅模式下土壤理化性状变化特征及影响因素分析

相对于 CK 而言,RGC 处理可有效提高土壤养分含量,但会降低土壤 pH 值,增加土壤容重和紧实度,其原因可能与 RGC 处理具有丰富的杂草多样性、较高的生物量以及鹅以杂草和作物基部叶片为食,养分以粪便形式还田,从而使 RGC 处理模式具

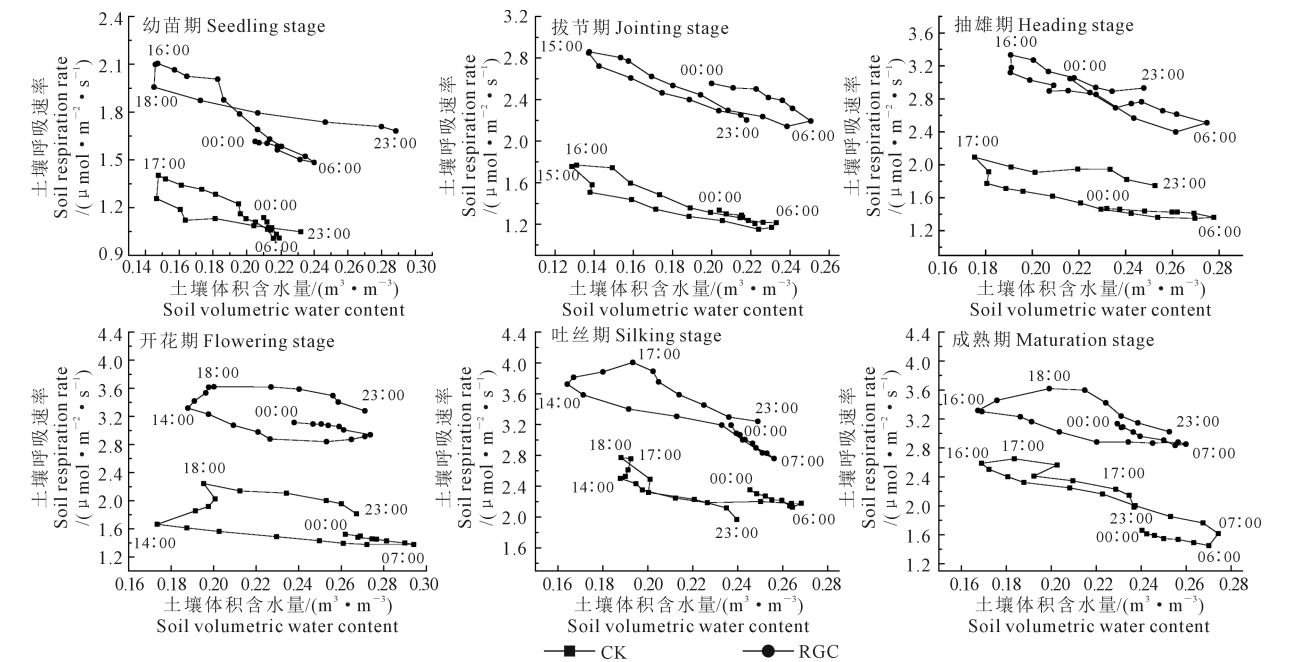


图 6 不同处理下土壤呼吸速率对土壤体积含水量的响应

Fig.6 Response of soil respiration rate to soil volumetric water content under different treatments

表 2 不同处理下土壤呼吸与土壤温度、体积含水量的复合关系

Table 2 Compound relation between soil respiration and temperature and volume water content under different treatments								
处理 Treatment	生长期 Growing period	拟合方程 Fitting equation	R^2	N	P	拟合方程 Fitting equation	R^2	Q_{10}
CK	幼苗期 Seedling stage	$y = 1.332 + 0.019t - 2.372w$	0.903	24	0.000	$y = 0.786e^{0.025t}$	0.736	1.284
	拔节期 Jointing stage	$y = 0.394 - 0.084t - 0.006w$	0.981	24	0.000	$y = 0.847e^{0.029t}$	0.666	1.336
	抽雄期 Tasseling stage	$y = 0.464 - 0.055t - 0.009w$	0.900	24	0.000	$y = 0.975e^{0.032t}$	0.258	1.377
	开花期 Flowering stage	$y = 0.421 - 0.017t - 0.009w$	0.965	24	0.000	$y = 1.158e^{0.021t}$	0.244	1.234
	吐丝期 Silking stage	$y = 0.409 - 0.031t - 0.006w$	0.862	24	0.000	$y = 1.711e^{0.017t}$	0.530	1.185
	成熟期 Maturation stage	$y = 0.400 - 0.046t - 0.005w$	0.931	24	0.000	$y = 0.898e^{0.045t}$	0.560	1.568
RGC	幼苗期 Seedling stage	$y = 0.430 - 0.113t - 0.002w$	0.583	24	0.000	$y = 1.186e^{0.026t}$	0.640	1.297
	拔节期 Jointing stage	$y = 0.449 - 0.052t - 0.008w$	0.915	24	0.000	$y = 1.682e^{0.024t}$	0.677	1.271
	抽雄期 Tasseling stage	$y = 0.459 - 0.054t - 0.005w$	0.898	24	0.000	$y = 1.909e^{0.026t}$	0.568	1.298
	开花期 Flowering stage	$y = 0.338 - 0.007t + 0.007w$	0.910	24	0.000	$y = 2.608e^{0.011t}$	0.325	1.116
	吐丝期 Silking stage	$y = 0.390 - 0.003t + 0.009w$	0.942	24	0.000	$y = 1.818e^{0.034t}$	0.807	1.405
	成熟期 Maturation stage	$y = 0.437 - 0.027t + 0.008w$	0.965	24	0.000	$y = 2.461e^{0.013t}$	0.305	1.139

注: y 为土壤呼吸速率, t 为 10 cm 深度土壤温度, w 为 5 cm 深土壤体含水量。
Note: y is the soil respiration rate, t is the soil temperature at 10 cm depth, and w is the soil volume moisture content at 5 cm depth.

有更加良好的物质循环和养分反馈特性,但鹅的活动会增加土壤紧实度和土壤容重,同时,鹅粪为生理酸性肥,可使土壤酸化。综上可知,RGC 处理模式可降低化肥投入,减小环境污染,同时,土壤养分含量明显增加,土壤肥力有效性提高,另外,土壤 pH 值的降低,有利于盐渍化土壤理化性状的改善。

各生长期土壤温度和体积含水量均呈“单峰型”日变化趋势,且整个生育期内,土壤体含水量表现为 RGC>CK,这主要可能是鹅产生的粪便增加了土壤有机质含量,改善了土壤物理性状,提高了土壤保水保肥性能,从而使得 RGC 处理的体积含水量高于 CK。本研究中,土壤温度表现为 CK>RGC,其原因可能在于 RGC 处理地上生物量 (386.30 g·m⁻²) 是 CK (5.67 g·m⁻²) 的 68.13 倍,盖度 (90.56%) 是 CK (7.22%) 的 12.54 倍^[9],这可使得 RGC 处理能有效阻挡太阳辐射,同时,RGC 处理较高的体积含水量和有机质含量使得其比热容大于 CK,导致在同一大气环境条件下,RGC 处理的温度变化(升温或降温)小于 CK。可见,RGC 模式可有效提高土壤保水能力,降低土壤温度。

3.2 玉米田养鹅模式下土壤呼吸变化特征及影响因素分析

本研究对 RGC 模式下土壤呼吸速率的研究表明,CK 和 RGC 土壤呼吸速率均呈“单峰型”日变化特征,但不同测定日期土壤呼吸峰值出现时间存在差异,这与大多数研究结果^[10-11]一致。其原因可能是不同测定季节的作物生长状况^[12]、测定时段的天气变化特征^[13]、样地土壤的类型和质地^[14]、作物根系分布及生物量^[15]、土壤生物组成及分布^[16]等不同有关。同时,CK 和 RGC 的田间管理措施和外源

养分输入等存在差异,这也可导致在同一测定条件下土壤呼吸峰值出现时间上存在位差。

在整个生长期内,CK 土壤呼吸速率峰值出现在吐丝期,其值变化范围在 1.92~3.14 μmol·m⁻²·s⁻¹,均值为 2.32 μmol·m⁻²·s⁻¹。RGC 处理土壤呼吸速率峰值亦出现在吐丝期,其值变化范围在 2.39~4.21 μmol·m⁻²·s⁻¹,均值为 3.32 μmol·m⁻²·s⁻¹,RGC 处理较 CK 提高了 43.10% ($P<0.05$)。相对于 CK 而言,其一,RGC 处理具有更高的地上地下生物量,其二,鹅的活动为土壤增加了额外的碳源和氮源,增强了土壤微生物活性^[17],提升了土壤微生物呼吸的碳排放速率,同时,由于养分的额外输入,使得 RGC 较 CK 更能满足作物生长的养分需求,使植物的根系生物量、土壤养分、微生物多样性和酶活性均有提高^[18-19],从而提高了土壤自养呼吸,表现为 RGC 处理的土壤呼吸整体高于 CK。CK 处理为单施化肥,而化肥的施用会降低微生物多样性、活性及碳源的利用效率^[20],从而抑制了土壤异养呼吸的能力,降低了土壤呼吸速率。其他生长期平均土壤呼吸速率均表现为 RGC>CK。

从土壤呼吸空间变异性的角度,RGC 处理的土壤呼吸速率空间变异性远小于 CK,这可能是因为长期的鹅粪输入土壤后改善了土壤理化性状,增加了土壤团聚体对有机碳的物理保护,从而使得 RGC 模式的土壤碳库相对较稳定,土壤呼吸速率的空间变异性小;另外,RGC 模式长期的鹅粪输入增加了土壤微生物的营养来源,改善其生存环境,提高土壤微生物的种类和数量,使得其在外界环境变化时具有更高的抵抗能力,故使得 RGC 模式下的土壤呼吸速率变异性较小。

3.3 玉米田养鹅模式下土壤呼吸速率与土壤温度、体积含水量的关系

土壤呼吸速率的变化主要是受土壤温度和土壤体积含水量的协同影响,而非单一因子的作用^[21]。本研究表明,CK 和 RGC 处理的土壤温度和体积含水量均可显著影响土壤呼吸速率的变化,二者可共同解释土壤呼吸变化的 86.21%~98.12% (CK) 和 58.32%~96.51% (RGC),可见,相对于 CK, RGC 处理可能会通过改善土壤养分结构及物理性质,从而减弱土壤呼吸对外界环境的响应程度。相关研究表明,在没有水分胁迫的条件下,土壤温度与土壤呼吸之间呈显著正相关关系^[22],而土壤水分只有在最低或最高时才会对土壤呼吸速率产生影响^[23]。本研究中,土壤呼吸速率随土壤温度的变化呈正相关近椭圆形分布关系,与土壤体积含水量之间呈负相关椭圆分布关系,但在极值出现时间上,土壤呼吸速率略滞后于土壤温度和体积含水量的变化。Vargas 等^[24]研究得出,光合作用是造成土壤呼吸与土壤温度日滞后现象的主要因素,其原因可能是温度的增加导致植物的蒸腾作用增加,植物叶片水分减少,限制了光合作用和减少了光合产物向根部的输送,同时,光合产物从叶片输送至根系需要一定的时间,导致了增温与根呼吸之间产生了位差,从而影响了根呼吸,导致了呼吸作用的滞后现象;另外,土壤热传递符合傅里叶热传导定律^[25],表层土壤是连接地上与地下热辐射和气体交换的关键层,土壤呼吸动态变化优先受近地表温度的影响,而深层土壤呼吸受到增温的影响较小,导致表层和深层土壤呼吸速率之间出现位差^[26],使得土壤呼吸速率滞后于温度的变化。

3.4 玉米田养鹅模式下土壤呼吸温度敏感性

研究者常用温度敏感性系数(Q_{10})来反映土壤温度和土壤呼吸速率之间的关系,Zheng 等^[27]研究表明,不同农业管理措施下土壤温度敏感性系数(Q_{10} 值)的变化范围分别在 1.28~4.75 和 2.35~3.49。在本研究中,CK 和 RGC 处理的 Q_{10} 值变化范围分别为 1.19~1.38 和 1.12~1.30,均小于以上研究结果,但本研究结果与 Raich 等^[28]的研究范围相似(Q_{10} 值范围为 1.3~3.3)。有研究表明,相对于难分解有机质而言,易分解有机质的 Q_{10} 值相对较小^[29],本研究中,RGC 处理的 Q_{10} 值整体小于 CK 处理,这主要是因为本研究区域农田土壤类型为沙壤土,沙粒含量较高,肥力较低,相对于 CK 而言,RGC 处理通过鹅粪投入和杂草腐殖化^[30],增加了土壤有机质含量,改善了土壤物理结构、提高了土壤胶结、保肥

和缓冲能力^[31],同时,RGC 处理有鹅的活动,提高了土壤紧实度,降低了孔隙度,从而使得本研究中 Q_{10} 值表现为 $RGC < CK$,即玉米田养鹅生产模式可有效降低高寒区域农田土壤温度敏感性。

4 结 论

本文基于全球气候变化及青藏高原高寒环境条件的双重背景下,研究高寒区域玉米田养鹅模式下土壤碳排放特征,所得结论如下:

1) 相对于 CK 而言,RGC 处理可有效提高土壤养分含量,但会降低土壤 pH 值,增加土壤容重和紧实度;

2) 土壤温度、体积含水量和碳排放速率均表现为“单峰型”日变化特征,但在峰值和谷值出现时间上存在差异,即土壤呼吸速率滞后于土壤温度和含水量的变化。双变量拟合模型显示,土壤呼吸速率的日变化极显著响应土壤温度与体积含水量的协同变化($86.21\% < R^2 < 98.12\%$),但不同测定日期的响应程度存在差异;

3) 整个生育期内,土壤碳排放速率均表现为 $RGC > CK$,说明玉米田养鹅模式可有效提高土壤碳排放效率,但从空间变异性(变异系数 $CK > RGC$)和温度敏感性系数(Q_{10} 值表现为 $CK(1.19 \sim 1.38) > RGC(1.12 \sim 1.30)$)来看,玉米田养鹅生产模式可有效提高土壤呼吸抵抗外界干扰的能力和降低高寒区域农田土壤温度敏感性;

4) 本研究测定期间,土壤呼吸速率表现为 $RGC > CK$,但变异系数表现为 $CK > RGC$,说明 CK 的土壤呼吸更容易受到外界环境变化的影响。因此,在高寒区域农田进行玉米田养鹅模式,有利于提高土壤肥力、增加土壤碳稳定性,降低土壤碳排放速率温度敏感性,这对高寒环境条件下玉米田养鹅模式的进行及土壤固碳减排具有一定指导意义。

参 考 文 献:

- [1] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81-99.
- [3] YU G R, ZHENG Z M, WANG Q F, et al. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(16): 6074-6080.
- [4] 陈书涛,宋大威,牛传坡,等.管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响[J].环境科学,2009,30(10):2858-2865.
- CHEN S T, ZHU D W, NIU C P, et al. Effects of management regime

on soil respiration from agroecosystems [J]. Environmental Science, 2009, 30(10): 2858-2865.

[5] 关法春,田飞鹏,沙志鹏,等.不同生产方式下肉鹅养殖场地的贡献及生产效果[J].中国农业大学学报,2013,18(4):129-133.

GUAN F C, TIAN F P, SHA Z P, et al. Contribution of goose feeding space and production effects on the different production modes [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(4): 129-133.

[6] 张宇阳,沙志鹏,关法春,等.玉米田养鹅措施对杂草群落生态特征的影响[J].生物多样性,2014,22(4):492-501.

ZHANG Y Y, SHA Z P, GUAN F C, et al. Effect of raising geese in cornfield on ecological characteristics of weed community [J]. Biodiversity Science, 2014, 22(4): 492-501.

[7] 沙志鹏,王军峰,关法春.西藏东南缘农牧复合系统—玉米田放牧鹅的生物多样性和经济效益分析[J].草地学报,2014,22(1):213-216.

SHA Z P, WANG J F, GUAN F C. Theagri-pastoral compound ecosystem of southeast Tibet-analyses of biodiversity and economic benefits of raising geese in cornfields [J]. Acta AgrectirSinica, 2014, 22(1): 213-216.

[8] FANG C, MONCRIEFF J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165.

[9] 全淑萍,关法春,曹舰艇,等.“玉米田养鹅”农田生态系统下的土壤温度影响机制[J].中国农业大学学报,2017,22(9):64-71.

TONG S P, GUAN F C, CAO J T, et al. Influence mechanism of the farmland ecosystem of “Raising geese in corn field” on soil temperature [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 64-71.

[10] 张立欣.增温与增雨对克氏针茅 (*Stipakrylovii*) 草原植物光合特性与土壤呼吸的影响 [D].呼和浩特:内蒙古大学,2013.

ZHANG L X. Photosynthetic characteristics and soil respiration under warming and precipitation enhancement in *Stipakrylovii* steppe in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2013.

[11] 毛一男,胡振华,彭致功,等.不同施肥水平对夏玉米土壤呼吸的影响研究[J].中国农村水利水电,2019,(4):42-46.

MAO Y N, HU Z H, PENG Z G, et al. Effects of different nitrogen levels on soil respiration of summer maize [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, (4): 42-46.

[12] 王雪,李景,汪俊玉,等.免耕施肥条件下冬小麦季土壤呼吸速率及影响因素[J].中国土壤与肥料,2017,(3):105-110.

WANG X, LI J, WANG J Y, et al. Seasonal change and effecting factors on soil respiration of winter-wheat farmland under no-tillage and fertilizing [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2017, (3): 105-110.

[13] 刘合满,曹丽花,马和平.土壤呼吸日动态特征及其与大气温度、湿度的响应[J].水土保持学报,2013,27(1):193-196,202.

LIU H M, CAO L H, MA H P. Diurnal dynamics of soil respiration and its response to atmospheric temperature and humidity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 193-196, 202.

[14] 王芸,赵鹏祥.华北地区土地利用类型对土壤呼吸、有机碳组分和水稳性团聚体的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):59-65.

WANG Y, ZHAO P X. Effect of land use types on stability of soil aggregates, soil organic carbon fractions and soil respiration in northern China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 59-65.

[15] 武文明,杨光明,沙丽清.西双版纳地区稻田 CO₂ 排放通量[J].生态学报,2009,29(9):4983-4992.

WU W M, YANG G M, SHA L Q. CO₂ emission from paddy soils in Xishuangbanna, southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4983-4992.

[16] 孙大川.农田生态系统 CO₂ 通量影响因素分析[J].现代农村科技,2021,(3):100.

SUN D C. Analysis on influencing factors of CO₂ flux in farmland ecosystem [J]. Modern Rural Science and Technology, 2021, (3): 100.

[17] 马忠明,杜少平,王平,等.长期定位施肥对小麦玉米间作土壤酶活性的影响[J].核农学报,2011,25(4):796-801,823.

MA Z M, DU S P, WANG P, et al. Effects of long-term located fertilization on soil enzymatic activities for wheat-maize intercropping in irrigated desert soils [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2011, 25(4): 796-801, 823.

[18] 董二伟,王成,丁玉川,等.高粱生长及其土壤环境对不同培肥措施的响应[J].华北农学报,2017,32(2):217-225.

DONG E W, WANG C, DING Y C, et al. Response of different fertilizing on growth and soil environment of sorghum [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(2): 217-225.

[19] LIU E K, YAN C R, MEI X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 173-180.

[20] 蔡艳,郝明德,臧逸飞,等.不同轮作制下长期施肥旱地土壤微生物多样性特征[J].核农学报,2015,29(2):344-350.

CAI Y, HAO M D, ZANG Y F, et al. Effect of long-term fertilization on microbial diversity of black loessial soil based on 454 sequencing technology [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(2): 344-350.

[21] ZHOU L Y, ZHOU X H, SHAO J J, et al. Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2016, 22(9): 3157-3169.

[22] 严俊霞,张媛,焦晓燕.施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J].环境科学,2019,40(12):5515-5523.

YAN J X, ZHANG Y, JIAO X Y. Effect of fertilization on soil respiration and its temperature sensitivity in a sorghum field [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5515-5523.

[23] 耿肖臣,李勇,于寒青,等.坡耕地侵蚀区和堆积区初春土壤呼吸的变化[J].核农学报,2012,26(3):543-551,593.

GENG X C, LI Y, YU H Q, et al. The variations of soil respiration at the eroded and deposited sites of the cultivated slopes during early spring time [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(3): 543-551, 593.

[24] VARGAS R, ALLEN M F. Diel patterns of soil respiration in a tropical forest after Hurricane Wilma [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(G3): 1-10.

[25] PAVELKA M, ACOSTA M, MAREK M V, et al. Dependence of the Q₁₀ values on the depth of the soil temperature measuring point [J]. Plant and Soil, 2007, 292(1/2): 171-179.