

藏东南巴宜区农田及草地土壤呼吸速率变化特征

高文于, 杨红, 吕庆鑫, 顾琪

(西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏 林芝 860000)

摘要:为研究藏东南巴宜区农田及草地土壤呼吸日变化特征及其影响因子,以藏东南巴宜区农田和草地为研究对象,采用PS9000&SC-12土壤碳通量测定系统对土壤呼吸速率进行原位监测。结果表明:(1)农田及草地土壤温度日变化表现为:6:00~13:00为快速升温期,14:00~19:00为快速降温期;土壤体积含水量在8:00~13:00为快速上升期,农田快速下降阶段为21:00~7:00,草地为23:00~7:00。(2)整体来看,农田及草地土壤呼吸速率日变化均表现为“单峰型”变化趋势。草地增幅和降幅远小于农田,可见,草地的碳排放更加稳定,对外界干扰的响应程度更小。(3)通过拟合方程可知,农田及草地土壤呼吸速率对温度的响应较土壤体积含水量更显著,在土壤温度上升期,农田土壤呼吸速率最大值滞后于土壤温度最大值4 h,草地滞后5 h,夜间变化基本同步,且夜间农田和草地土壤呼吸速率与土壤温度之间均呈极显著正相关关系。综上,农田生态系统土壤呼吸速率对外界环境的响应较草地生态系统更加敏感,具有更大的土壤碳排放量。

关键词:农田;草地;土壤温度;土壤体积含水量;土壤呼吸速率

中图分类号:S151.9

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2024)05-0032-09

Characteristics of Soil Respiration Rate Changes in Farmland and Grassland in Bayi District, Southeastern Xizang

GAO Wenyu, YANG Hong, LYU Qingxin, GU Qi

(College of Resources and Environment, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: To study the diurnal variation characteristics and influencing factors of soil respiration in farmland and grassland in Bayi District, southeastern Xizang. Taking farmland and grassland in Bayi District, southeastern Tibet as the research object, the PS9000&SC-12 soil carbon flux measurement system was used for in-situ monitoring of soil respiration rate. The results showed that: (1) The daily variation of soil temperature in farmland and grassland showed a rapid warming period from 6:00 to 13:00 and a rapid cooling period from 14:00 to 19:00. The soil volumetric moisture content shows a period of rapid growth from 8:00 to 13:00, while it shows an opposite trend from 21:00 to 7:00, and the period of grassland is 23:00-7:00. (2) Overall, the daily variation of soil respiration rate in farmland and grassland shows a "unimodal" trend. From the analysis of daily changes, the increase and decrease in grassland are much smaller than those in farmland, indicating that grassland carbon emissions are more stable and less responsive to external disturbances. (3) By fitting the equation, it can be seen that the response of soil respiration rate in farmland and grassland to temperature is more significant than that of soil volumetric moisture content. During the period of soil temperature rise, the maximum soil respiration rate in farmland lags behind the maximum soil temperature by 4 hours, while in grassland it lags by 5 hours. The nighttime changes are basically synchronous, and there is a highly significant positive correlation between soil respiration rate and soil temperature in farmland and grassland at night. In summary, the response of soil respiration rate of farmland ecosystem to the external environment is more sensitive than that of grassland ecosystem, and the soil carbon emission is larger.

Key words: Farmland; Grassland; Soil temperature; Volume moisture content of soil; Soil respiration rate

收稿日期:2024-02-21

基金项目:西藏自治区科学技术厅厅校联合项目(XZ202101ZR0030G)

作者简介:高文于(2001-),男,在读本科,主要从事农业资源与环境研究。

土壤呼吸(Soil respiration)是指土壤产生、并向大气释放CO₂气体的过程,主要包括植物根部、土壤动物、土壤微生物活动及土壤碳矿化分解所释放的CO₂^[1]。是陆地生态系统碳循环中碳输出

的主要途径^[2],亦是土壤碳库和大气碳库之间碳流通最主要的途径和类型^[3],其微小的变化将会对全球碳平衡产生深远影响。

农田作为陆地生态系统中重要的半封闭式土地利用方式,是全球陆地碳库中最活跃的部分。人类生产活动对土壤呼吸影响巨大,每年释放的CO₂量可达640 g/m²,约占全国陆地生态系统土壤碳排放量的22.2%^[4]。随着农业集约化生产,农田农药化肥的大量使用,土壤质量下降速率加快^[5-6],这将进一步增加对农田土壤碳库的扰动,促进土壤碳排放,增加大气温室气体浓度,加剧全球气候变暖压力。据统计,我国天然草地总面积约为3.9×10⁸ hm²,约占国土面积的40.9%^[7-8],其中西藏草地总面积达8.202×10⁷ hm²^[9],约占我国天然草地面积的21.0%。然而,由于西藏特殊的地理位置、恶劣的气候环境和较为年轻的成土历史,导致草地生态系统十分脆弱^[10-12]。近年来,随着全球气候变化的进一步加剧和人为对农田、草地干扰力度的不断增强,使得西藏脆弱的土壤环境质量日益下降、土壤生物群落稳定性降低、土壤自我调节能力可能被打破,从而导致外界环境微小的变化可能会引起土壤活动的剧烈变化。相关研究表明,土壤温湿度与土壤呼吸的关系极为密切^[13],温湿度可以用来共同解释土壤呼吸速率的变化高达60%~90%^[14],通常被用来解释土壤呼吸的日变化和季节性变化;在干旱半干旱地区,土壤湿度往往成为改变温度的重要因素之一,并且成为控制土壤呼吸的关键因素^[15];也有研究表明,土壤呼吸速率会滞后于土壤温度的变化,且与土壤温湿度有显著的相关关系^[16-17];赖焱敏等^[18]在不同退化草地土壤呼吸的研究中发现,在中度退化以前,土壤呼吸速率的变化主要受到温度的影响,在中度退化之后,土壤呼吸速率对土壤湿度的响应较温度更加敏感。由此可见,在不同的研究区域和不同的研究方法中,土壤温湿度对土壤呼吸速率的影响机制尚存在不同的解释。

西藏地处世界第三极,是全球气候变化的敏感区。由于海拔高、气温低、土壤养分循环受限,导致高寒陆地生态系统土壤中存储了大量的有机碳,这将成为气候变化加剧背景下全球碳排放最敏感的区域^[9]。故研究青藏高原高寒农田及草地生态系统土壤碳排放,可为土地低碳优化发展提供科学依据^[20]。本研究立足青藏高原高寒农田及草地生态系统,探索藏东南地区冬季高寒农田及草地生态系统的土壤呼吸速率日变化特征,以及

对土壤温度和土壤体积含水量的响应程度,旨在为高寒农田及草地生态系统土壤呼吸碳排放的科学预测提供数据支持。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地位于西藏农牧学院资源与环境学院苗圃(29°40'22" N, 94°20'48" E, 海拔2 966 m),年平均气温8.6 °C,最热月(7月)平均气温15.6 °C,最冷月(1月)平均气温0.2 °C,≥10 °C积温1 800~2 200 °C·d,年平均降雨量650~700 mm,年日照时数约2 000 h,年总辐射量6.1×10⁹~7.0×10⁹ J/m²,光合有效辐射为2.5×10⁹~3.0×10⁹ J/m²,无霜期180 d。农田为青稞种植地,草地为生长良好的自然草地,土壤为酸性沙壤土。

1.2 试验方法

土壤呼吸速率(Soil respiration rate, Rs)采用理加联合公司土壤通量便携测定仪(PS9000&SC-12)进行测定,在测定前48 h,将规格为高15 cm、外径20 cm的PVC土壤环插入土壤,深度为5 cm,并沿地面剪除立地植物及除去枯枝落叶。土壤温度和土壤体积含水量利用PS9000&SC-12测定仪的土壤温湿度探头进行测定,将温湿度探头在距离土壤环5 cm的位置插入,测定10 cm深度的土壤温度和土壤体积含水量。测定日期为2021年12月23日8:00至26日7:00,测量步长300 s,排空时间200 s,每隔500 s记录1次数据。测量期间无降水,气象条件基本无差异。

1.3 数据处理

试验数据采用Excel 2019软件进行整理,农田及草地的土壤呼吸速率、土壤温度及体积含水量日动态作图以及相关分析采用Origin 21软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 农田、草地土壤温度日变化特征

由图1 a可知,农田土壤温度日变化特征均呈“单峰型”变化趋势,且3 d间差异较小,12月23日、24日和25日的温度变化范围分别为:-7.71~15.24 °C、-8.70~17.21 °C、-7.97~14.82 °C。草地土壤温度日变化特征与农田土壤温度日变化特征基本一致(图1 b),12月23日、24日和25日的温度变化范围分别为:-8.27~14.90 °C、-7.92~13.87 °C、-7.49~13.07 °C。

将3 d的农田及草地土壤温度以小时为单位

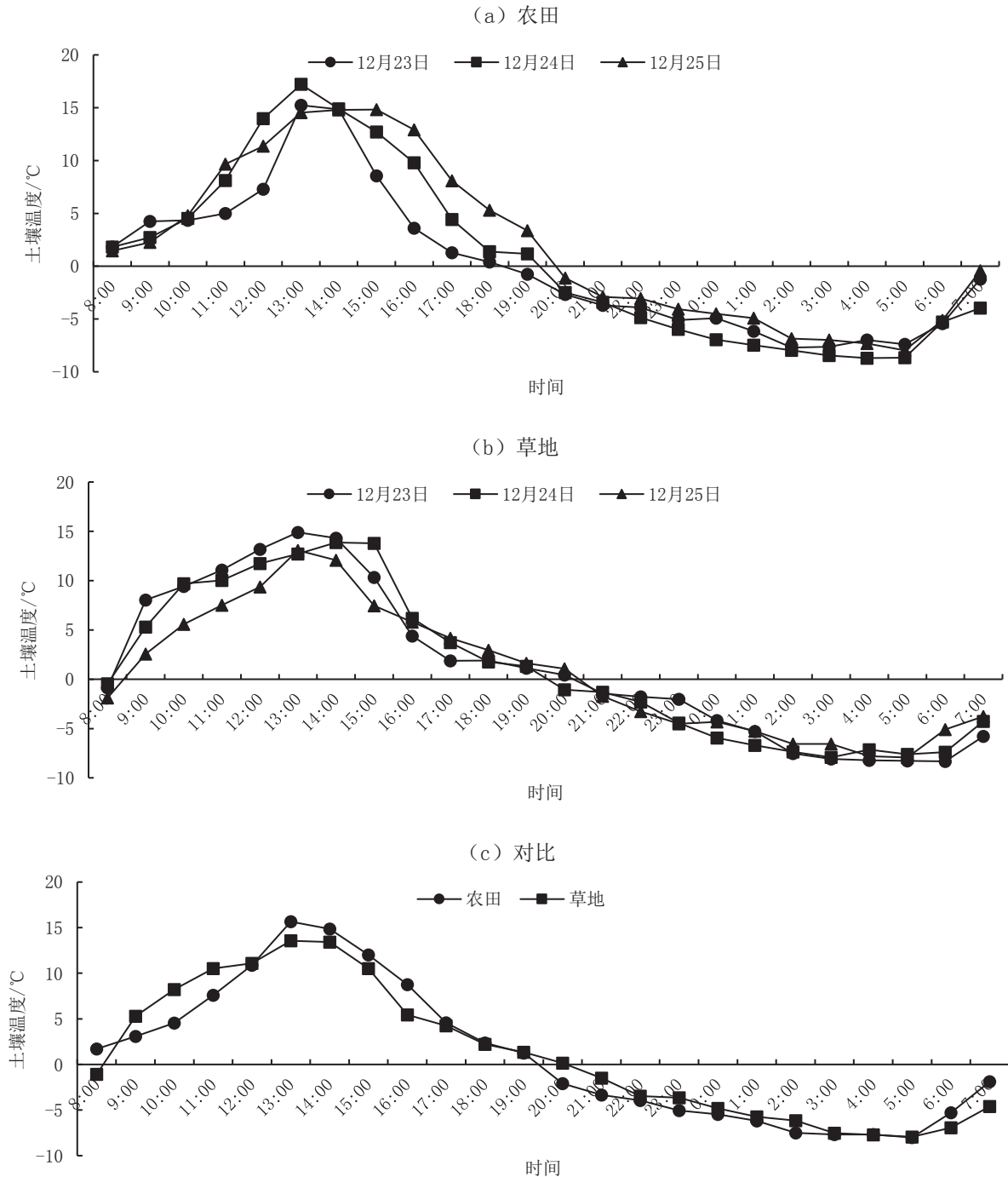


图1 土壤温度日变化特征

进行平均,结果如图1c所示。由图1c可知,农田和草地的土壤温度变化趋势一致,6:00~13:00为快速增温期,在13:00达到最大值(农田为 $15.66\text{ }^{\circ}\text{C}$,草地为 $13.56\text{ }^{\circ}\text{C}$);14:00~19:00为快速降温期(农田降温幅度为 $13.59\text{ }^{\circ}\text{C}$,草地为 $12.06\text{ }^{\circ}\text{C}$);夜间降温幅度较小,20:00~5:00农田的降温幅度为 $5.91\text{ }^{\circ}\text{C}$,草地为 $8.09\text{ }^{\circ}\text{C}$,在5:00达到最小值(农田为 $-8.01\text{ }^{\circ}\text{C}$,草地为 $-7.94\text{ }^{\circ}\text{C}$)。综上可知,农田土壤温度日变化幅度($23.67\text{ }^{\circ}\text{C}$)大于草地($21.50\text{ }^{\circ}\text{C}$),草地土壤温度的日积温($24.94\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)

高于农田($23.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)。

2.2 农田、草地土壤体积含水量日变化特征

由图2a可知,农田土壤体积含水量日变化范围较大,但3d间差异较小,12月23日、24日和25日土壤体积含水量变化范围分别为: $1.87\sim 2.64\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $2.02\sim 2.73\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $1.89\sim 2.90\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。草地土壤体积含水量较农田土壤体积分含水量的日变化范围较小(图2b),12月23日、24日和25日土壤体积含水量变化范围分别为: $3.29\sim 3.53\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $3.31\sim 3.50\text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $3.33\sim 3.56\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

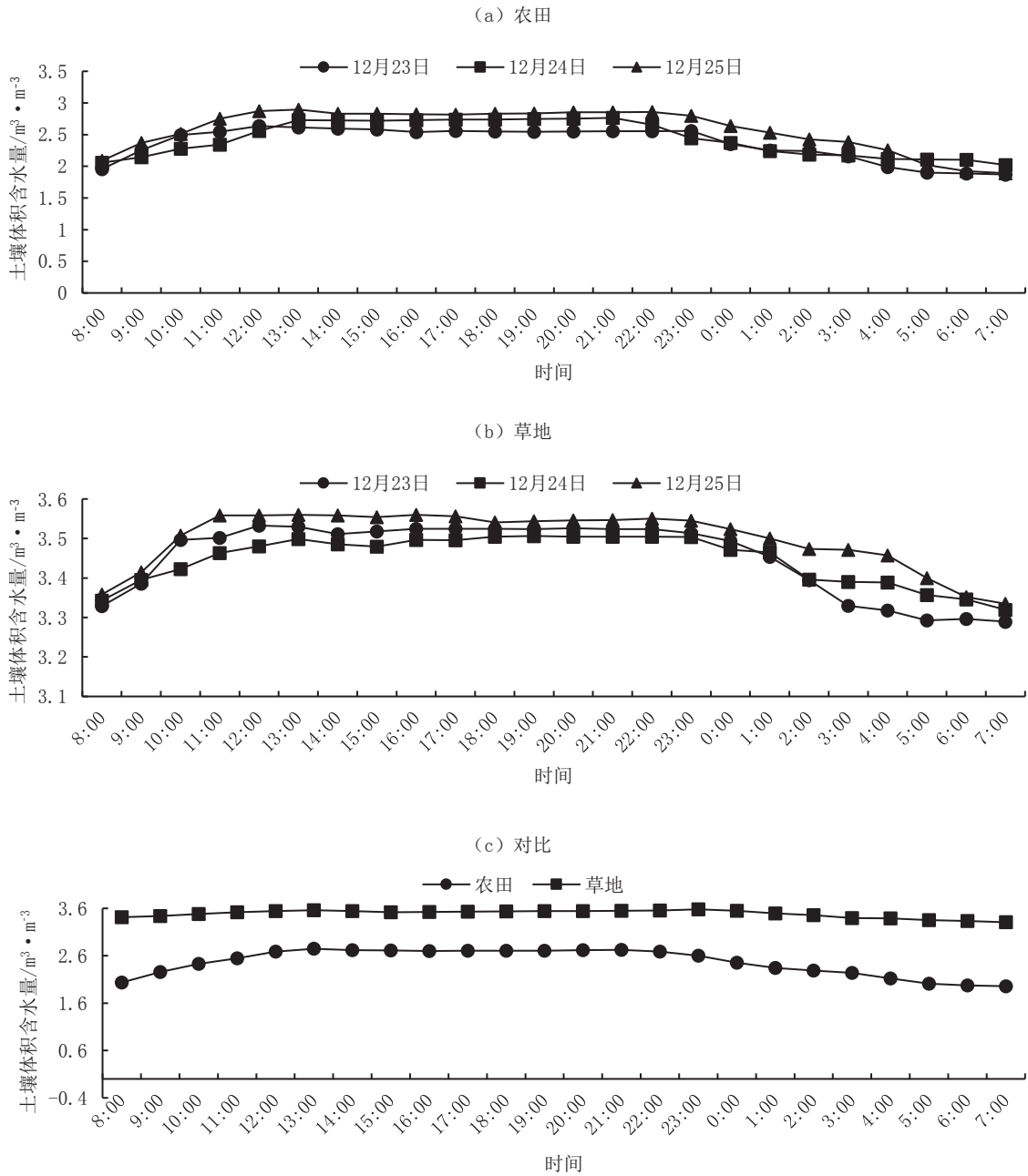


图2 土壤体积含水量日变化特征

将3 d的农田及草地土壤体积含水量以小时为单位进行平均,结果如图2 c所示。由图2 c可知,农田和草地土壤体积含水量变化趋势一致。农田及草地土壤体积含水量均在8:00~13:00为快速上升期,上升幅度分别为 $0.71 m^3/m^3$ 和 $0.15 m^3/m^3$,在13:00达到最大值,其值分别为 2.75 和 $3.56 m^3/m^3$,至21:00(农田)和23:00(草地)土壤体积含水量均无明显变化,农田与草地土壤体积含水量快速下降阶段存在差异,农田快速下降阶段为21:00~7:00,草地为23:00~7:00,下降幅度分别为 $0.77 m^3/m^3$ 和 $0.27 m^3/m^3$,均在7:00达到最小值,分别为 $1.96 m^3/m^3$ 和 $3.31 m^3/m^3$ 。

2.3 农田、草地土壤呼吸速率日变化特征

由图3 a可知,农田土壤呼吸速率呈“单峰型”日变化趋势,3 d间差异较小。12月23日、24日和25日的土壤呼吸速率变化范围分别为: $1.32\sim 1.74 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、 $1.27\sim 1.67 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、 $1.29\sim 1.69 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。草地土壤呼吸速率日变化特征与农田相似(图3 b),3 d的土壤呼吸速率变化范围分别为: $0.60\sim 0.81 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、 $0.59\sim 0.82 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 、 $0.59\sim 0.80 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 。

将3 d的农田及草地土壤呼吸速率以小时为单位进行平均,结果如图3 c所示。由图3 c可知,农田土壤呼吸速率增加时段可分为2个阶段,即

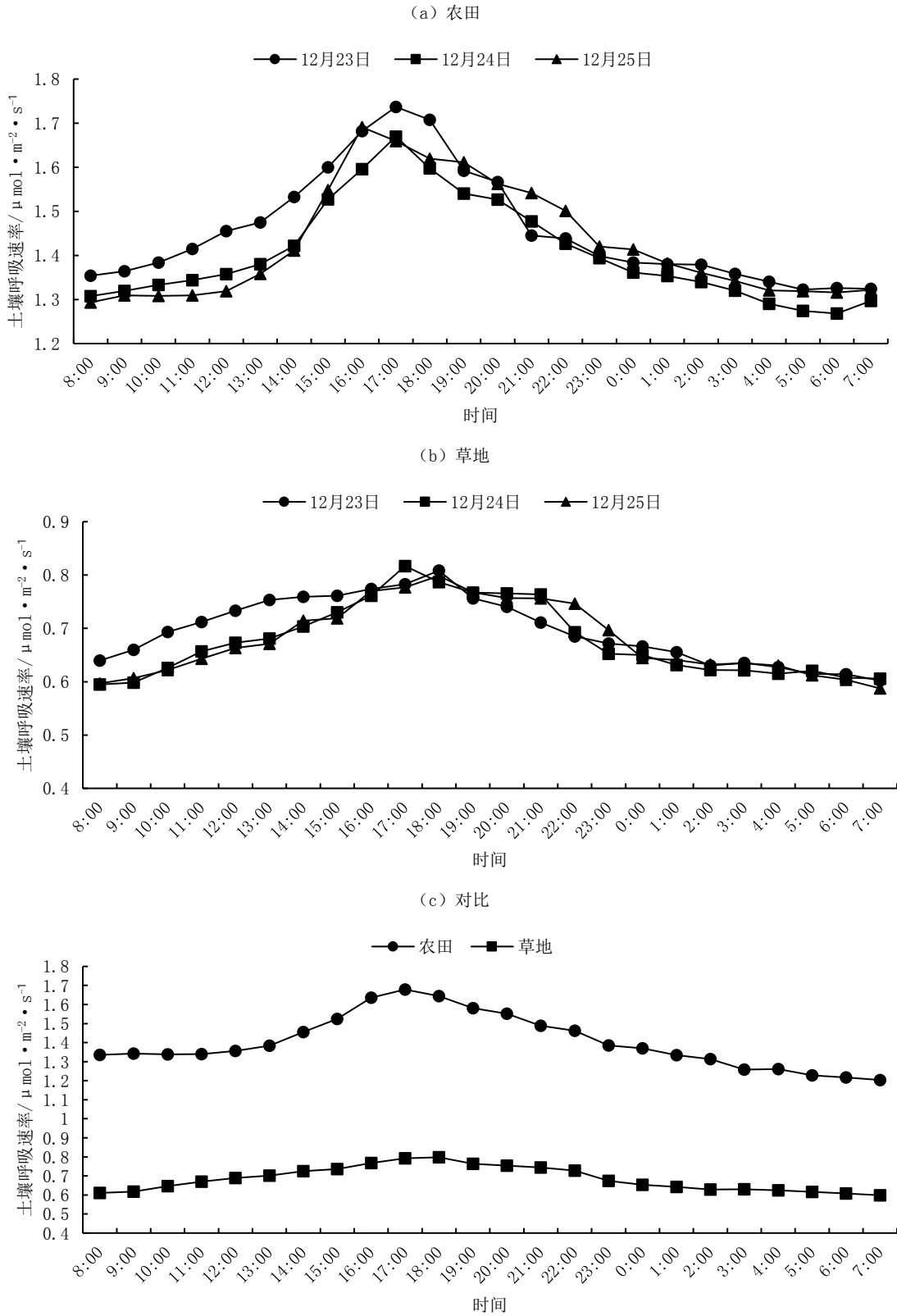


图3 土壤呼吸速率日变化特征

在 8:00~12:00 增加缓慢, 13:00~17:00 快速增加, 增幅为 $0.30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 在 17:00 达最大值 $1.68 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 快速下降阶段为 18:00~7:00, 降幅为 $0.44 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最小值为 $1.20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。草地土壤呼吸变化幅度较农田小, 8:00~18:00 呈上升

趋势, 上升幅度为 $0.19 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最大值为 $0.80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 19:00~7:00 呈下降趋势, 降幅为 $0.17 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最小值为 $0.60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.4 农田、草地土壤呼吸速率对土壤温度的响应

将试验期间的土壤呼吸速率和土壤温度作为

3组重复进行平均后做散点图,可见二者并非简单的线性关系,而是呈近椭圆形的分布特征(图4)。由图4a可知,在农田土壤呼吸速率增加阶段,表现为土壤呼吸速率最大值滞后于土壤温度最大值4h;由图4b可知,在草地土壤呼吸速率增加阶段,土壤呼吸速率最大值滞后于土壤温度最大值5h。可见,在土壤温度上升阶段,两种土地利用方式下的土壤的呼吸速率和土壤温度变化并未同步,存在不同程度的滞后效应。

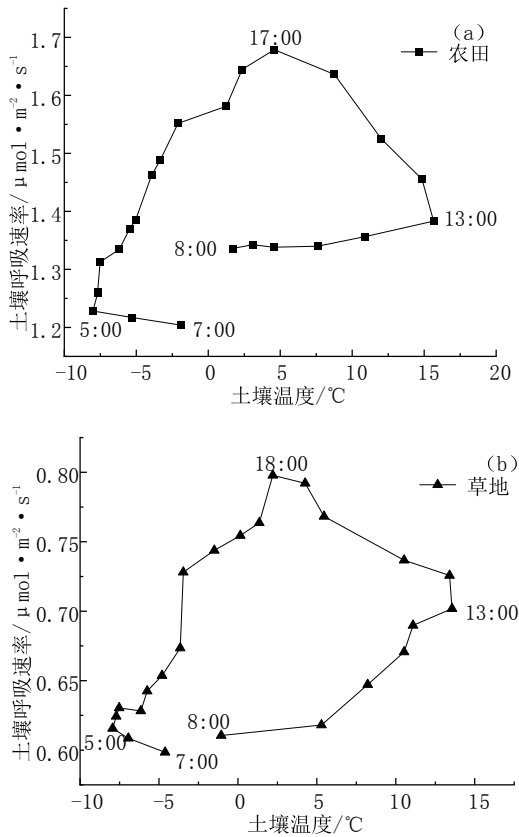


图4 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

由图5可知,在土壤呼吸速率下降阶段,农田和草地土壤呼吸速率与温度变化同步,无滞后现象,且农田土壤呼吸速率与土壤温度呈极显著的正相关关系(图5a),可以用线性回归方程 $y=0.0355x+1.5604$ ($R^2=0.9457, P<0.01, n=13$)来表示二者关系;草地土壤呼吸速率与土壤温度亦呈极显著的正相关关系(图5b),可以用线性回归方程 $y=0.0163x+0.7469$ ($R^2=0.9357, P<0.01, n=13$)表示二者关系,即该时间段随着土壤温度降低,土壤呼吸速率显著降低,且农田土壤呼吸速率对温度的响应程度大于草地。

2.5 农田、草地土壤呼吸速率对土壤体积含水量的响应

将试验期间的土壤呼吸速率和土壤体积含水

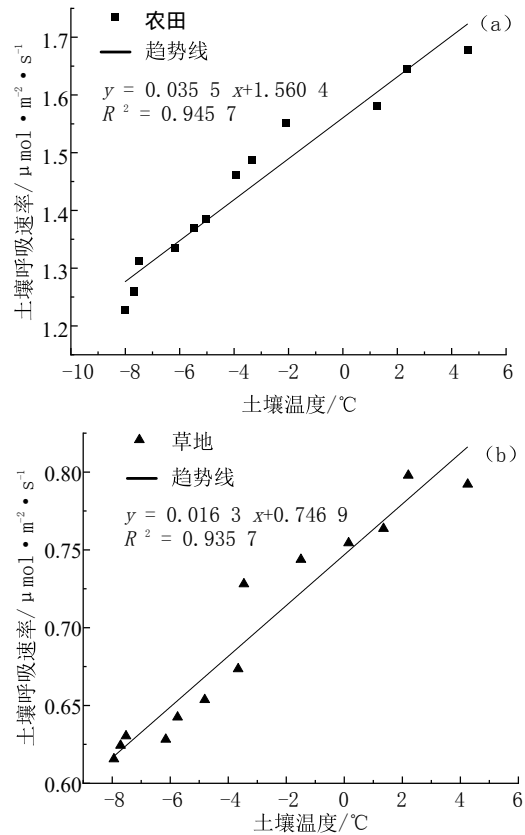


图5 土壤呼吸速率下降阶段土壤呼吸速率与土壤温度的关系

量相关数据分别作为3组重复进行平均,作对应关系的散点图。由图6可知,农田及草地土壤体积含水量与土壤呼吸速率的相关关系可用线性回归方程 $y=0.3998x+0.4202$ ($R^2=0.6552, P<0.05, n=24$)和 $y=0.5969x-1.3962$ ($R^2=0.5645, P<0.05, n=24$)表示,可见农田及草地土壤呼吸速率均与土壤体积含水量呈正相关关系,且农田土壤呼吸速率对土壤体积含水量的响应程度大于草地。

3 讨论

3.1 土壤温湿度日变化特征

本研究发现,在试验期间,农田和草地土壤温度、土壤体积含水量日变化均呈“单峰型”变化趋势,这与杨红等^[21]的研究结果一致。刘合满^[16]、杨红^[17]等对巴宜区农田的土壤呼吸动态特征的研究发现,土壤温度最大值出现在14:00~16:00;最小值出现在7:00。本研究中,农田和草地土壤温度最大值出现在13:00,最小值出现在5:00,土壤温度最大值和最小值出现时间上提前了1~2h,其原因可能是本研究土壤呼吸监测季节与前者不同所致。本研究中,农田和草地土壤温度变化趋势一致,但草地土壤温度变化极差(21.50°C)小于农田

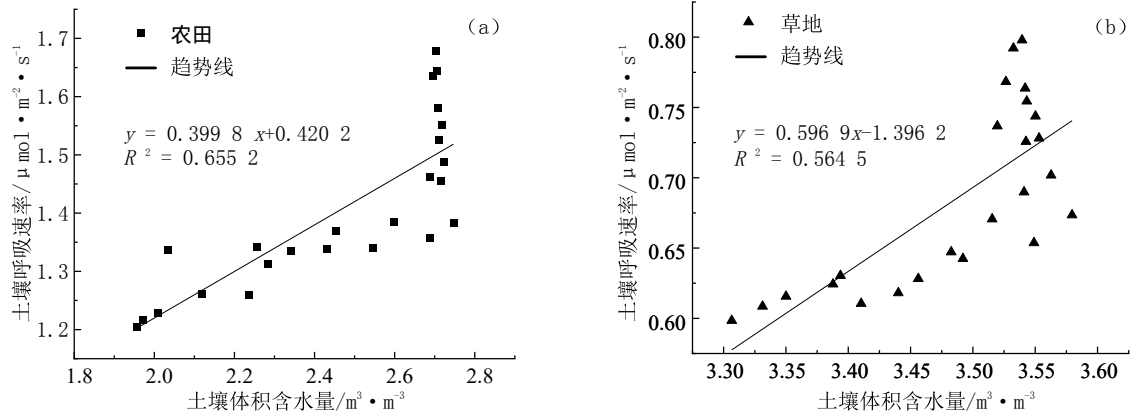


图6 土壤呼吸速率与土壤体积含水量的关系

(23.67 °C),其原因可能是草地土壤表面覆被枯枝落叶,而农田土壤表层裸露,这与李留振等^[22]的研究结果一致,即土壤表面植被覆盖可以减缓土壤温度的波动。

本研究中,藏东南巴宜区农田和草地土壤体积含水量变化趋势一致,但草地土壤体积含水量始终高于农田,其原因与草地受外界扰动较小,土壤结构完整,加之草地土壤植物根系发达,持水性能良好,而农田由于受外界扰动较大,土壤结构被破坏,质地松散,孔隙度大,透水率高,加之农田土壤表层无植被覆盖,接受的太阳辐射能较多,地表蒸发量较大^[23-24],从而使得在整个监测期内草地土壤体积含水量始终高于农田。

杨红等^[17]对藏东南巴宜区5-10月的农田土壤体积含水量变化研究发现,农田土壤体积含水量随着白天土壤温度的升高呈降低的趋势,而在夜间随着土壤温度降低呈增加的趋势,赵广东等^[25]在研究不同深度土壤温度与土壤体积含水量的关系中发现,5~20 cm土层存在土壤温度高的土层土壤体积含水量低的现象。本研究结果与之相反,但与涂志华等^[26]在1月份对人工林土壤呼吸监测中的研究结果一致,即在无降雨事件发生的情况下,土壤体积含水量在白天上升,夜间下降。可见,由于监测时间的不同会导致土壤温度与土壤体积含水量对应的变化趋势不同。本研究监测时间在12月底,农田和草地夜间土壤温度在0 °C以下的时间长达12 h,土壤体积含水量迅速变化的两个阶段可能是由于温度降低引起的土壤水分结冰形成固态水,而温度升高引起的固态水转化为液态水造成的。

3.2 土壤呼吸速率日变化特征

本研究中土壤呼吸速率变化呈“单峰型”变化趋势。农田和草地土壤呼吸速率分别在17:00和

18:00达最大值,最小值出现在7:00。杨红等^[17]在对藏东南巴宜区土壤呼吸监测中发现土壤呼吸速率最大值出现在15:00~17:00,最小值出现在7:00~9:00。与本研究结果相似。刘季聪等^[27]对农牧交错带不同土地利用方式下土壤呼吸速率的研究发现,新开垦的农田土壤呼吸速率的最高值出现时间较退耕草地提前2 h。本研究中,农田土壤呼吸速率最大值较草地提前1 h。其原因可能是由于农田土壤呼吸速率对温度的响应敏感程度大于草地,从而导致其与温度变化的时间差更小。就变化幅度而言,农田土壤的呼吸速率比草地土壤波动大,可能是农田土壤温度和土壤体积含水量日变化大于草地导致的。

本研究中,农田土壤呼吸速率明显高于草地。这与杨新明等^[23]对农田和自由放牧草地的土壤呼吸速率研究结果、刘季聪等^[27]对农牧交错带新开农田土壤呼吸速率的研究结果以及周洪华等^[28]对干旱区棉花地及草地的土壤呼吸速率研究结果一致。即当土地利用方式发生变化,尤其是林地或草地转变为农田后,土壤呼吸速率会显著增加^[29-31]。其原因可能是耕作会引起土壤的透水性、导气性以及表土与近地空气的接触面积增加,好氧微生物活动活跃以及土壤酶活性增加,矿化分解剧烈,同时会造成土壤容重、土壤黏滞性以及结构稳定性降低^[32-34],从而导致土壤呼吸速率增加。

3.3 土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应

土壤温度通过对土壤微生物代谢、植物根系生长和动植物残体以及有机碳氧化分解速率的影响来改变土壤呼吸作用^[35-36]。本研究发现,白天农田土壤呼吸速率最大值滞后于土壤温度最大值4 h,草地滞后5 h,夜间二者均呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。这与前人研究结果一致^[23,37-38]。产生

滞后的原因可能主要是表土在受到太阳辐射后,温度在向深层土壤传导的过程中会产生一定的时间差,同时,土壤动物、微生物及植物根系在感受到温度变化而作出强于低温时的呼吸反应亦会产生时间差,因此,在本研究中表现为土壤呼吸滞后于温度的变化。从本研究农田和草地土壤呼吸速率对温度的响应时间上来看,农田较草地更能积极地响应土壤温度的变化。

富利等^[39]研究表明,土壤体积含水量低于6%时,土壤呼吸速率与土壤体积含水量呈正相关关系,Davidson等^[40]研究亦表明,土壤呼吸速率受土壤体积含水量影响显著。许敏等^[41]在研究喀斯特石漠化地区不同土地利用方式下土壤呼吸的季节动态中指出,植物郁闭度高,土壤含水量高和土壤温度较低,会抑制土壤排放二氧化碳。本研究中,农田和草地土壤体积含水量对土壤呼吸速率的影响均表现为正相关关系,但农田土壤呼吸速率对土壤体积分含水量的响应程度($R^2=0.66$)大于草地($R^2=0.56$)。其原因可能与农田长期受人类干扰,其土壤结构稳定性低于草地,土壤养分的固持能力较低,加之农田受人类养分回归的影响,存在养分富集和碳激发效应,同时,由于农田长期处于低含水量环境中,故土壤水分的变化对其影响显著。综上,农田土壤呼吸速率对土壤体积分含水量的响应较草地更敏感。

4 结 论

(1)藏东南巴宜区冬季农田土壤温度日变化幅度大于草地,夜间土壤温度降至0℃以下时间较草地提前1h;草地土壤体积含水量明显高于农田,由于土壤结冰的影响,在土壤体积含水量变化幅度较大时期其变化趋势与土壤温度保持一致。

(2)与草地相比,农田土壤呼吸速率较高,可见,土地经人为活动干扰后,土壤保水性变差,水分流失严重,孔隙度增加,可增加土壤呼吸速率。同时,土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应增强。

(3)土壤温度和土壤体积含水量共同影响土壤呼吸速率,土壤温度对土壤呼吸速率的影响更为显著($P<0.05$)。将土壤温度对土壤呼吸速率的影响分为两个阶段(白天和夜间),土壤温度在夜间与土壤呼吸速率呈极显著正相关关系,而白天土壤呼吸速率的最大值会滞后于土壤温度最大值4~5h。

参考文献:

- [1] 闫美杰,时伟宇,杜盛.土壤呼吸测定方法述评与展望[J].水土保持研究,2010,17(6):148-152,157.
- [2] 刘昱.中国农业生态系统的碳氮平衡模拟、耦合和政策评估[D].北京:清华大学,2016.
- [3] William S, Jeffrey A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry(Dordrecht), 2000, 48(1): 7-20.
- [4] 曹兴,金莉莉.农田生态系统土壤呼吸研究进展[J].现代农业科技,2008(22):156,159.
- [5] 吴流通.我国土壤质量及土壤资源的可持续利用分析[J].南方农业,2018,12(24):169-170.
- [6] 柳金鹏.西北地区耕地发展与农业生产集约化研究[J].山西农经,2022(5):99-101,105.
- [7] 周悦,刘博,龙春林.中国植物种质资源在草原生态系统修复中的作用[J].中国草地学报,2016,38(1):111-115.
- [8] Kang L, Han X, Zhang Z, et al. Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [9] 刘兴元,王玮.藏北草地生态系统可持续发展能力评价[J].自然资源学报,2013,28(7):1209-1220.
- [10] 潘崇双,刘青海,李继荣,等.西藏地区土壤盐渍化研究进展[J].现代农业科技,2020(17):169-170,173.
- [11] 张亮,韩静艳,王道涵,等.草地生态系统土壤呼吸对放牧干扰的响应研究进展[J].生态科学,2017,36(2):201-207.
- [12] 高清竹,段敏杰,万运帆,等.藏北地区生态与环境敏感性评价[J].生态学报,2010,30(15):4129-4136.
- [13] 高希旺,张玉珍,马涛,等.黄土丘陵沟壑区机修梯田与坡地土壤呼吸特征研究[J].西南农业学报,2016,29(3):641-646.
- [14] 王小国,朱波,王艳强,等.不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J].生态学报,2007,27(5):1960-1968.
- [15] 张萌,卢杰,任毅华.土壤呼吸影响因素及测定方法的研究进展[J].山东林业科技,2021,51(2):100-106,92.
- [16] 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.
- [17] 杨红,次仁央金,刘合满,等.模拟增温对高寒地区农田土壤呼吸日动态特征的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(11):133-142.
- [18] 赖焯敏,薛嫻,赖日文,等.青藏高原北麓河流域不同退化程度高寒草甸土壤呼吸特征[J].草业科学,2019,36(4):952-959,924,926.
- [19] 张志春.三江源地区高寒土壤有机碳赋存特性与气候及植被变化的联系—以下拉秀剖面古土壤序列为例[D].南京:南京农业大学,2017.
- [20] 邓康龙,汪倩倩,陈欣悦,等.土地利用碳排放研究进展与展望[J].绿色科技,2022,24(9):185-190.
- [21] 杨红,柳文杰,刘合满,等.西藏玉米田养鹅模式下的土壤碳排放特征[J].干旱地区农业研究,2022,40(1):203-212,246.
- [22] 李留振.黄河故道滩地不同植被的温度效应[J].浙江农业

- 科学, 2010(3): 640-644.
- [23] 杨新明, 韩磊, 庄涛. 北方农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸动态特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1733-1740.
- [24] 孟祥宇, 冉成, 李金平, 等. 秸秆还田对东北黑土稻区土壤养分及水稻产量的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(2): 64-67, 89.
- [25] 赵广东, 陈健, 史作民, 等. 川西亚高山暗针叶林土壤温度和水分动态及其与气象因子的关系[J]. 山地学报, 2021, 39(2): 183-193.
- [26] 涂志华, 庞卓, 赵阳, 等. 北京西山侧柏人工林土壤呼吸组分及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2948-2956.
- [27] 刘季骢, 李志刚, 李兴. 北方农牧交错带不同土地利用方式土壤呼吸速率探究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, 29(3): 306-309.
- [28] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 等. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素[J]. 地理科学, 2011, 31(2): 190-196.
- [29] 王国兵, 郝岩松, 王兵, 等. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006(S2): 73-79.
- [30] Grunzweig J M, Sparrow S D, Chapin F S. Impact of forest conversion to agriculture on carbon and nitrogen mineralization in subarctic Alaska[J]. Biogeochemistry, 2003, 64(2): 271-296.
- [31] 跃思, 纪宝明, 黄耀, 等. 农垦与放牧对内蒙古草原 N_2O 、 CO_2 排放和 CH_4 吸收的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 7-13.
- [32] 刘江汉, 何文寿. 粉垄耕作对土壤性质及马铃薯产量的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(2): 20-25.
- [33] 陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 等. 耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1702-1712.
- [34] 陈彦云, 夏皖豫, 赵辉, 等. 粉垄耕作对耕地土壤酶活性、微生物群落结构和功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 5009-5021.
- [35] 杨晶, 李凌浩. 土壤呼吸及其测定法[J]. 植物杂志, 2003(5): 36-37.
- [36] Risk D, Kellman L, Beltrami H. Carbon dioxide in soil profiles: Production and temperature dependence [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(6): 1-4.
- [37] 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 等. 黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4648-4657.
- [38] 朱粲粲, 周忠发, 汤云涛, 等. 白云岩地区土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的响应关系[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1947-1956.
- [39] 富利, 张勇勇, 赵文智. 荒漠-绿洲区不同土地利用类型土壤呼吸对温湿度的响应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2690-2697.
- [40] Davidson E, Belk E, Boone R. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217-227.
- [41] 许敏, 熊康宁, 张俞, 等. 喀斯特石漠化地区不同土地利用方式下土壤呼吸的季节动态[J]. 西南农业学报, 2021, 34(10): 2240-2247.

(责任编辑: 范杰英)