

东北农场农作物生长季土壤呼吸对温度和含水量的响应

来雪慧, 李丹, 于波峰, 朱江, 姚志远, 张姝婷

(太原工业学院 环境与安全工程系, 太原 030008)

摘要:通过静态碱液吸收法测定了东北典型农场水稻和玉米两种农作物在生长期(4—7月)的土壤呼吸速率及其变化规律,分析了不同深度的土壤呼吸速率对土壤温度和土壤含水量的响应。结果表明:在作物生长期,水稻样地的土壤呼吸速率高于玉米样地。水稻和玉米样地在0—15 cm深度的土壤呼吸速率明显高于15—30 cm和30—60 cm。随着土壤深度的增加,土壤呼吸速率逐渐减小。水稻土壤的呼吸速率最大值为 $580.6 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,最小值为 $160.4 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$;而玉米的土壤呼吸速率最大值为 $565.3 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,最小值为 $137.5 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。水稻和玉米样地土壤呼吸速率与土壤温度呈现极显著相关关系($p < 0.01$),土壤温度曲线在4月到6月初明显上升,而土壤呼吸速率曲线在这一时段也呈相同态势;6月下旬到7月初土壤温度变化平稳,土壤呼吸速率与土壤温度的同步变化趋势不明显。同时,两种作物的土壤含水量与土壤呼吸速率间的相关性也极为显著($p < 0.01$),说明土壤含水量也能够解释生长期水稻和玉米的土壤呼吸速率变化。

关键词:土壤呼吸速率; 土壤温度; Q_{10} ; 含水量

中图分类号:S152

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0117-06

Effects of Soil Temperature and Water Content on Soil Respiration Rate During the Crop Growing Season in a Farm of Northern China

LAI Xuehui, LI Dan, YU Bofeng, ZHU Jiang, YAO Zhiyuan, ZHANG Shuting

(Department of Environment and Safety Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract: Soil respiration rates of rice and maize fields during the growing season (from April to July) were measured by static alkali absorption method, and the effects of soil temperature and water content on soil respiration rates of a typical farm in Northern China were also examined. The results showed that the soil respiration rates of paddy field were higher than maize field during the crop growing season, and soil respiration rates in 0—15 cm depth were significantly higher than that in 15—30 cm and 30—60 cm depths. Soil respiration rate decreased with the increase of soil depth. The maximum and minimum soil respiration rates of paddy field were $580.6 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ and $160.4 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, respectively, and the maximum and minimum values of maize field were $565.3 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ and $137.5 \mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, respectively. Soil respiration rates of rice and maize fields were found to be positively related to soil temperature ($p < 0.01$). Soil temperature had been rising from April to June and the soil respiration rate also presented the same escalating trend; while soil temperature varied smoothly from late June to early July and the synchronous change trend between soil respiration and temperature was not obvious. Meanwhile, there was obvious correlation between soil respiration rate and water content in rice and maize fields ($p < 0.01$), which indicated that soil water content can explain soil respiration rate change in rice and maize growing season.

Keywords: soil respiration rate; soil temperature; Q_{10} ; soil water content

土壤呼吸作用影响着大气中 CO_2 浓度的变化,同时对全球碳循环也有重要的影响^[1]。因此,在全球气候明显变化的背景下,测定各陆地生态系统的土壤呼吸作用的影响因素对于碳损失和全球变化的研究十分重要^[2-3]。大多数研究认为土壤温度、土壤湿度

以及两者的交互作用是影响土壤呼吸的主要驱动力^[4]。土壤呼吸作用对温度的响应结果很大程度上决定着全球碳循环与气候变化的相互作用^[5-6],有利于碳循环模型的优化与调整^[7]。大多学者认为,在土壤水分含量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关系,也就是说土壤含水量对呼吸作用的影响相对较小,这可能是由于被其他因子或误差所掩盖^[8]。

目前,对于土壤呼吸的研究大多仅限于森林^[9-10]和草地生态系统^[11-12],对于农田生态系统的研究则较少。农业生态系统被认为是全球碳库中最活跃的部分,大气中 20% 的 CO₂ 来源于农业生产等过程。近年来,对于农田生态系统及农作物的土壤呼吸作用研究也增多^[13-14],但主要集中在旱地农作物土壤方面,尤其是玉米^[15-16]和大豆^[17-18]。土壤呼吸与土壤温度之间的关系通常以温度敏感性表征(Q_{10}),即温度每增加 10℃ 土壤呼吸的变化。根据野外试验监测,发现中国土壤呼吸速率的温度敏感性 Q_{10} 值介于下辽河平原玉米田土壤的 0.93^[19]到川西亚高山针叶林土壤的 6.27^[20]范围之间,而南京的土壤—玉米系统中的 Q_{10} 值为 1.90~2.88^[21]。目前关于不同生态系统土壤呼吸作用的研究已经较为成熟,且大多关注土壤呼吸速率对温度、水分与底物变化的响应机理,而针对不同作物类型土壤呼吸速率的研究则较少。本文以位于东北粮食主产区的三江平原八五九农场为例,比较 2012 年 4—6 月,旱地典型作物(玉米)和水田作物(水稻)两种农作物的土壤呼吸速率差异,分析作物生长季不同农作物的土壤呼吸速率对土壤温度和含水量变化的响应以及土壤呼吸温度敏感性特点,并探讨土壤呼吸速率与不同土层温度、含水量的关系,旨在为评估和预测该区域的碳收支平衡提供科学依据。

1 研究区概况

黑龙江省八五九农场,地处三江平原沿江三角洲亚区,为典型的东北粮食生产基地。全场场区总面积为 1 355 km²,其中耕地面积 300 km²。八五九农场气候属寒温带季风性大陆气候,根据 1964—2010 年农场气象监测站数据,发现农场年平均气温 2.5℃,年平均最高气温为 7.9℃,年平均最低气温为 -2.8℃。年平均降水量约 559.6 mm,夏季短促而湿热,雨量集中,为 302.4 mm,占年平均降水量的 54%;冬季降水量最少,为 26.9 mm,占年平均降水量的 4.8%,10℃ 以上活动积温 2 439.96℃,冻结期长达 7~8 个月,平均冻土深度 141 cm。土壤以白浆土和沼泽土等为主,其中白浆土占研究区总面积的 60.7%。场内农田土壤表层(0—20 cm)的氮磷平均含量分别为 2.39,0.90 g/kg,而速效氮、速效磷和速效钾的平均含量为 236.5,21.3,144.9 mg/kg,有机质含量为 38.3 g/kg。整体而言,农场内耕地的有机质含量丰富,土壤养分氮磷含量较多。研究中样地位于八五九

农场的旱地和水田试验示范田,样地描述见表 1。

表 1 农作物样地位置与土壤理化性质

| 农作物 类型 | 地理位置 | pH | 总氮/ (g · kg ⁻¹) | C/N |
|-----------|--------------------------|------|--------------------------------|-------|
| 玉米 | 47°27.769'N,133°59.075'E | 5.97 | 2.04 | 10.96 |
| 水稻 | 47°33.093'N,134°22.574'E | 6.07 | 1.72 | 9.52 |

2 研究方法

2.1 样品采集

在水田、旱地进行水稻和玉米两种作物的土壤野外采样。考虑到研究区土壤类型中以白浆土为主,而白浆土在构造上分为 3 个层次,分别为黑土层、白浆层和沉积层。黑土层厚度一般为 0—15 cm,白浆层厚度一般在 15—30 cm,白浆层以下为沉积层。因此,根据白浆土的构造进行不同深度的土壤采样,分别选择 0—15,15—30,30—60 cm 共 3 个深度。八五九农场的作物生长季主要是每年的 4—7 月份,采样时在每个采样点于 2012 年 4 月 29 日、5 月 24 日、6 月 2 日、6 月 19 日和 7 月 2 日进行采样。对于水稻和玉米作物土壤,分别选取 1 m×1 m 样地各 3 块,各样地内用环刀采取不同深度(0—15,15—30,30—60 cm)的原状土样各 3 个。另外,将每块样地的多点土壤进行混合,以分析其土壤理化性质。采样后由于不能立即进行测定,因此将土壤样品置于 4℃ 冰箱保存。

2.2 测定方法

作物土壤样品的土壤呼吸速率通过静态碱液吸收法测定^[22]。该方法通过碱液(NaOH 或者 KOH 溶液)吸收 CO₂ 形成碳酸根,然后通过中和滴定法,计算剩余的碱量,从而求出 CO₂ 的排放量。土壤温度采用长杆针式土壤温度计测定,分别测定土壤环刀周围 0—15,15—30,30—60 cm 深度的土壤温度,每个样方测定 1 次。采用 24 h 烘干法测定土壤含水量,水浸—电位法测定土壤 pH 值,用浓硫酸重铬酸钾法测定土壤有机质,全氮通过元素分析仪测定。

2.3 数据处理方法

应用简单经验指数模型^[23]计算土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10}),其计算公式如下:

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

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

式中: R_s ——土壤呼吸速率[$\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$]; T ——不同农作物的土壤温度(℃); a ——0℃时的土壤呼吸速率[$\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$]; b ——温度响应系数;当 T 为 0℃ 时,土壤呼吸速率为 a 。

采用 SPSS 软件进行单因素方差分析和显著性差异分析,并利用 Excel 2010 作图。

3 结果与分析

3.1 不同农作物生长季土壤呼吸速率的变化

由图 1 可知,在研究区不同土壤深度的两种农作物土壤呼吸速率变化规律基本相似。水稻和玉米均呈现出 0—15 cm 深度的土壤呼吸速率明显高于 15—30 cm 和 30—60 cm。随着土壤深度的增加,土壤呼吸速率随之减小。这主要是由于土壤温度随着土壤深度的增加呈现逐渐降低的趋势。其中,通过配对样本 *T* 检验发现,玉米样地的土壤呼吸速率在 0—15 cm 与 15—30 cm 深度的差异性显著($p<0.05$)。水稻样地

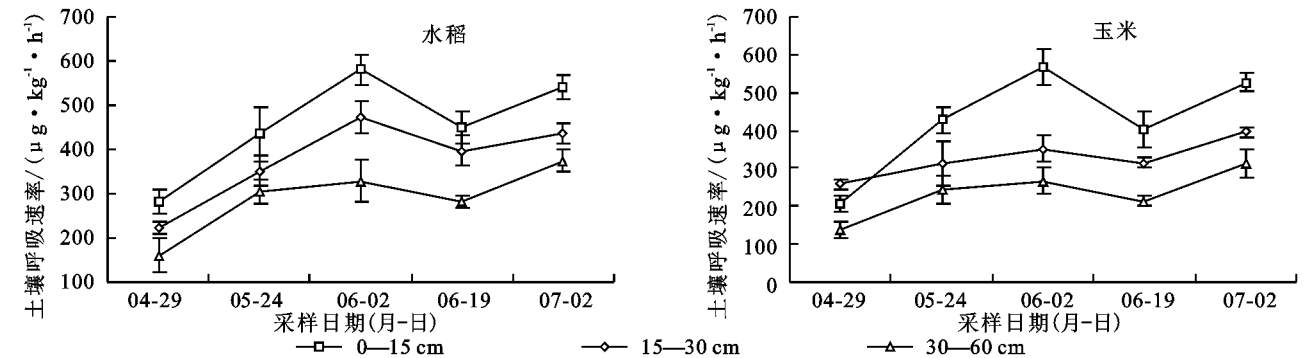


图 1 2012 年生长季水稻和玉米土壤呼吸速率的变化(平均值±标准误差)

从图 2 可以看出,随着土壤温度的上升,两种农作物样地的土壤呼吸速率也呈现增加趋势;而当土壤温度下降时,土壤呼吸速率也随之降低。说明土壤呼吸速率与土壤温度在植物生长期基本保持同步变化的趋势。值得一提的是,土壤温度曲线在 4 月到 6 月初明显上升,而土壤呼吸速率曲线在这一时段也呈相同态势;6 月下旬到 7 月初土壤温度变化平稳,土壤呼吸速率与土壤温度的同步变化趋势不明显。另外,水稻土壤呼吸速率整体高于玉米。

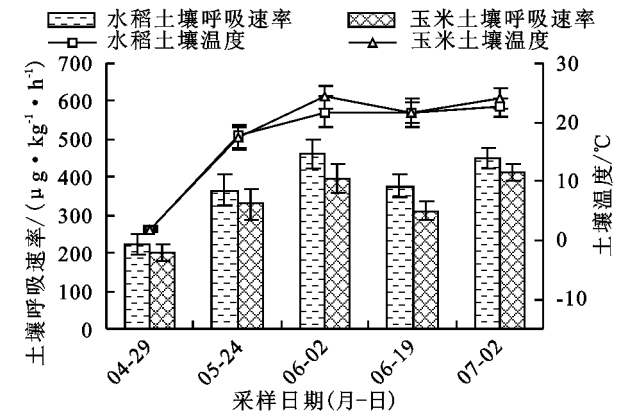


图 2 2012 年生长季水稻和玉米土壤呼吸速率的比较(平均值±标准误差)

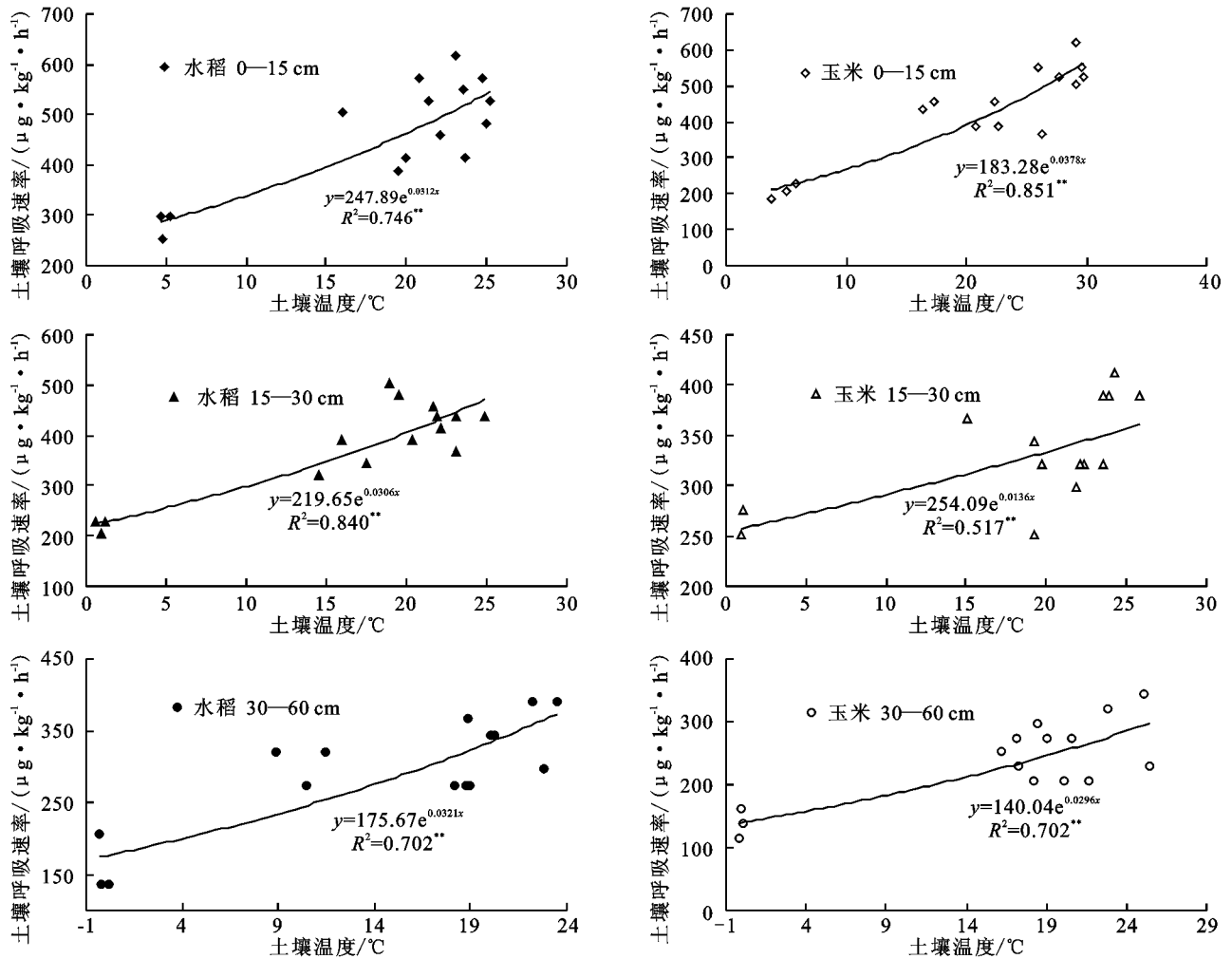
对于水稻,其土壤呼吸速率最大值为 618.8 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,此时土壤温度为 23.1℃,仅次于 6 月 19 日的 23.6℃和 7 月 2 日的 23.8℃;最小的土壤呼吸速率为 137.5 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,出现在 4 月 29 日 30—60 cm

土壤中的呼吸速率最大值为 580.6 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,出现在 0—15 cm 深度,而最小值为 30—60 cm 深度的 160.4 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。玉米的土壤呼吸速率最大值为 565.3 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,同样出现在土壤的表层,土壤呼吸速率的最小值为 137.5 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。另外,在农作物生长季,每个深度的土壤呼吸速率随着时间的变化整体呈现增长趋势,其中在 6 月 19 日整体有下降趋势,这是因为当日的气温和土壤温度均较低。同时,水稻和玉米的土壤呼吸速率最大值都出现在 6 月 2 日,而最小值均出现在 4 月 29 日,这都与土壤温度呈现了同步的变化趋势。

土壤深度处,对应的土壤温度为 -0.2℃,此时 3 个样地在 30—60 cm 处的平均土壤温度为 -0.1℃,其平均土壤呼吸速率为 160.4 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 。玉米的土壤最大呼吸速率为 618.8 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,当时的土壤温度为 29.1℃,是本研究中生长季的最高土壤温度,出现在 6 月 2 日 0—15 cm 表层土壤,此时 3 个样地的平均土壤温度为 29.5℃;最小土壤呼吸速率值为 114.6 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$,此时土壤温度为 4 月 29 日 30—60 cm 深度的一 0.2℃,是研究范围内的最低土壤温度。

3.2 土壤呼吸对温度的响应

从图 2 可以看出,两种农作物的土壤呼吸速率与土壤温度的变化规律具有较强的一致性,通过图 3 进一步说明两者之间较好的相关性($p<0.01$)。采用公式(1)所拟合的土壤温度与土壤呼吸速率之间的关系,发现在不同土壤深度、土壤温度对呼吸速率的解释能力不同。对于水稻来说,0—15,15—30,30—60 cm 土壤呼吸速率与土壤温度之间的相关系数分别为 0.8637,0.9165,0.8379,说明水稻在 15—30 cm 深度土壤温度对呼吸速率的解释能力最好;而玉米在不同深度的土壤呼吸速率与土壤温度之间的相关系数分别为 0.9225,0.7190,0.8379,表明玉米在土壤表层(0—15 cm)处土壤温度对呼吸速率的解释能力最好。总体而言,随着土壤深度的增加,水稻和玉米在 30—60 cm 处土壤温度对呼吸作用的解释能力最差。



注: ** 表示相关性达到极显著水平, $p < 0.01$ 。

图 3 水稻和玉米不同深度土壤呼吸速率与土壤温度的相关关系

根据简单经验指数模型中的公式(2)计算土壤呼吸温度敏感性(Q_{10}),图 4 为水稻和玉米在不同土壤深度的 Q_{10} 值。水稻和玉米在生长季的 Q_{10} 值变化范围为 1.15~1.47。水稻在不同深度的 Q_{10} 值变化不大,约 1.40。玉米的 Q_{10} 值在不同深度变化较大,其最大值出现在 0—15 cm 深度,为 1.47,最小值为 1.15,出现在 15—30 cm 深度。总体而言,水稻和玉米的土壤呼吸温度敏感性差异较小。

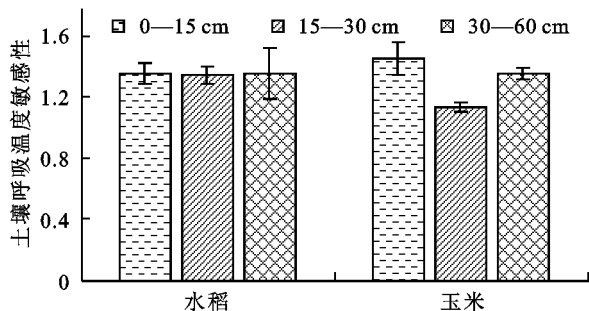


图 4 水稻和玉米在不同土壤深度的土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值(平均值±标准误差)

3.3 土壤呼吸对含水量的响应

由表 2 可知,土壤含水量的日变化幅度较大,同时

水稻土壤的含水量明显高于玉米土壤。水稻土壤的含水量在 30.65%~51.94% 范围内变动,玉米土壤的含水量在 20.96%~32.56% 变动。从表 2 可以看出,水稻和玉米两种作物在不同深度的土壤呼吸速率与土壤含水量均呈现正相关关系,且相关性极显著($p < 0.01$)。同时,两种作物的土壤呼吸速率与含水量相关性均表现为在土壤表层(0—15 cm)最好,在 15—30 cm 深度较差,但相关系数均高于 0.7。研究区生长季作物土壤含水量对土壤呼吸速率的解释能力较好,其中,水稻和玉米样地 0—15 cm 土壤含水量对土壤呼吸作用的解释能力分别为 84.42% 和 84.68%,是研究区土壤含水量对呼吸速率解释能力最强的,其余的土壤深度土壤含水量对土壤呼吸作用的解释能力也都高于 70%。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 土壤温度对土壤呼吸速率的影响 温度是控制陆地生态系统的重要因素,因此许多研究利用温度来预测全球变化对土壤呼吸作用的影响^[24-25]。温度升

高将增强生物的代谢活动,促使土壤呼吸量增加。许多研究证实,土壤呼吸在一定温度范围内,随温度的升高而加快。在三江平原,冬季气温很低,且土壤冰冻期很长,土壤微生物长时间处于休眠状态,其土壤呼吸速率较低。但进入四月份(春季)后,土壤开始解冻,土壤呼吸速率随着微生物活性的增强而增加。然而,本研究发现水稻的土壤呼吸速率变化在生长季并没有表现出明显的单峰型。这主要是因为从水稻开始种植到成熟,这段时间内水田一直保持着淹水状态,好氧微生物处于嫌气环境,其活性受到严重的抑制。温度对土壤呼吸速率的影响就会不明显,因此,土壤呼吸速率的变化在植物生长期会呈现出双峰型或多峰型曲线。

| 表 2 农作物不同深度呼吸速率与土壤含水量的关系 | | | | |
|--------------------------|-------------|-------------------------|----------|------------|
| 农作物 类型 | 土壤 深度/cm | 指数 方程 | 相关 系数 | 显著性 水平 |
| 水稻 | 0—15 | $y = 51.037e^{0.0589x}$ | 0.8442 | $p < 0.01$ |
| | 15—30 | $y = 79.961e^{0.0374x}$ | 0.7434 | $p < 0.01$ |
| | 30—60 | $y = 36.576e^{0.0629x}$ | 0.8097 | $p < 0.01$ |
| 玉米 | 0—15 | $y = 75.014e^{0.0562x}$ | 0.8468 | $p < 0.01$ |
| | 15—30 | $y = 172.53e^{0.0248x}$ | 0.7277 | $p < 0.01$ |
| | 30—60 | $y = 74.561e^{0.0471x}$ | 0.7422 | $p < 0.01$ |

土壤呼吸速率与土壤温度之间的显著关系已经在众多研究中得到证实。但由于研究区域以及土壤特性的不同,土壤温度对呼吸速率的作用在不同土壤深度呈现出一定的差异性。本研究认为,水稻在生长期(4—7月)15—30 cm 深度土壤温度对土壤呼吸速率的解释能力高于 0—15 cm 和 30—60 cm,这与在内蒙古地区土壤温度对呼吸速率的影响研究中的结果一致^[11]。同时,本研究中玉米在 0—15 cm 深度土壤温度对呼吸作用的解释能力较高,也与诸多研究得到类似的结论^[26-27]。经过分析,发现主要有两方面的原因造成这种情况:首先,不同研究区域的自然条件、植被类型不同,它们对土壤温度与呼吸速率之间的关系产生不同的作用^[28]。土壤呼吸速率不仅受温度的控制,还可能受到湿度^[29]、季节^[30]、土壤养分、生物条件^[31]和外界干扰^[32]等因素的影响。另外,土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系还受到降水量的影响。降水较多的年份,土壤呼吸速率与土壤温度的关系减弱,但是与空气温度的关系却增强,降水较少的年份则结果完全相反^[33]。

4.1.2 土壤含水量对土壤呼吸速率的影响 通过研究发现,土壤温度对呼吸速率的影响总是可以找到一个指数函数来进行表征^[34]。然而,描述土壤含水量与呼吸速率之间关系的函数很多^[35],且这些函数方程具有很大的差异。本文中水稻和玉米样地的土壤温度和土壤含水量呈现极显著相关性($p < 0.01$),说明土壤温度与含水量存在着紧密的联系。为了消除温度的干扰,采用偏相关分析研究土壤呼吸速率与含

水量之间的关系。

本研究中,水稻和玉米在不同土壤深度,其土壤呼吸速率与土壤含水量之间均存在着极显著关系($p < 0.01$),土壤含水量对土壤呼吸的解释能力较强。研究区在 4 月 28 日—7 月 2 日总降水量为 126.24 mm,降水量较多,其土壤含水量为 20%~70%。有研究表明,过高的水分会减少土壤中 O₂ 的供应^[36],从而抑制好氧微生物的活性;而水分过低的时候,不仅微生物活性受到抑制,而且有机碳含量也会减少。同时,水分含量的过高或者过低都会限制土壤呼吸的温度敏感性^[37],且随着温度的升高,水分对敏感性的限制作用就会增强^[38]。

4.2 结论

- (1) 在作物生长期,水稻样地的土壤呼吸速率高于玉米样地。水稻和玉米样地在 0—15 cm 深度的土壤呼吸速率明显高于 15—30 cm 和 30—60 cm。随着土壤深度的增加,土壤呼吸速率逐渐减小。水稻土壤的呼吸速率最大值为 580.6 μg/(kg·h),最小值为 160.4 μg/(kg·h);而玉米的土壤呼吸速率最大值为 565.3 μg/(kg·h),最小值为 137.5 μg/(kg·h)。
- (2) 通过土壤温度与土壤呼吸速率的关系研究,发现在不同土壤深度水稻和玉米的土壤呼吸速率与土壤温度均呈现极显著相关关系($p < 0.01$)。同时水稻样地在 15—30 cm 深度的相关系数高于其他深度,而玉米样地的两者相关性在土壤表层(0—15 cm)处最好。水稻和玉米的土壤呼吸温度敏感性差异较小,水稻在不同深度的 Q₁₀ 值在 1.40 左右,玉米的 Q₁₀ 最大值出现在 0—15 cm 深度,为 1.47,最小值为 1.15,出现在 15—30 cm 深度。
- (3) 通过土壤呼吸速率对含水量的响应研究,发现水稻和玉米样地在不同深度的土壤呼吸速率与土壤含水量均呈现极显著相关关系($p < 0.01$)。水稻土壤的含水量在 30.65%~51.94% 范围内变动,玉米土壤的含水量在 20.96%~32.56% 变动。生长季农作物土壤含水量对土壤呼吸速率的解释能力较好,其中,水稻和玉米样地 0—15 cm 土壤含水量对土壤呼吸作用的解释能力分别达到 84.42% 和 84.68%。

参考文献:

[1] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀ [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 154-164.

[2] Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. Global Change Biology, 2004, 10(2): 161-169.

[3] Zeng X, Zhang W, Shen H, et al. Soil respiration response in different vegetation types at Mount Taihang, China [J]. Catena, 2014, 116(5): 78-85.

[4] Davidson E C, Belk E, Boone R D. 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.
- [5] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 1-6.
- [6] Jiang J S, Guo S L, Zhang Y J, et al. Changes in temperature sensitivity of soil respiration in the phases of a three-year crop rotation system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 150(7): 139-146.
- [7] Del Grosso S J, Parton W J, Mosier A R, et al. Modeling soil CO₂ emissions from ecosystems [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 71-91.
- [8] 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*, 2003, 23(5): 972-978.
- [9] 杨青, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统土壤呼吸动态变化的初探 [J]. *土壤通报*, 1999, 12(6): 254-256.
- [10] Pang X Y, Bao W K, Zhu B, et al. Responses of soil respiration and its temperature sensitivity to thinning in a pine plantation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172(4): 57-64.
- [11] 马骏, 唐海萍. 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 167-175.
- [12] 陈骥, 曹军骥, 魏永林, 等. 青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸对温度和湿度的响应 [J]. *草业学报*, 2014, 23(6): 78-86.
- [13] 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 [J]. *资源科学*, 2003, 25(5): 103-107.
- [14] 张容娟, 布乃顺, 崔军, 等. 土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30(24): 6698-6706.
- [15] 张俊丽, 廖允成, 曾爱, 等. 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 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1382-1388.
- [16] 张赛, 王龙昌, 周航飞, 等. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素 [J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6244-6255.
- [17] 杨兰芳, 蔡祖聪. 不同生长期盆栽大豆的土壤呼吸昼夜变化及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2955-2960.
- [18] 张赛, 罗海秀, 王龙昌, 等. 保护性耕作下大豆农田土壤呼吸及影响因素分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 913-920.
- [19] 王重阳, 王绍斌, 顾江新, 等. 下辽河平原玉米田土壤呼吸初步研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1240-1244.
- [20] 陈宝玉, 刘世荣, 葛剑平, 等. 川西亚高山针叶林土壤呼吸速率与不同土层温度的关系 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1219-1224.
- [21] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤—玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献 [J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4273-4280.
- [22] 苏永红, 冯起, 朱高峰, 等. 土壤呼吸与测定方法研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 57-65.
- [23] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [24] Reichstein M, Kätterer T, Andrén O, et al. Temperature sensitivity of decomposition in relation to soil organic matter pools: Critique and outlook [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 2(4): 317-321.
- [25] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems—recent progress and challenges [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 141-153.
- [26] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(1): 35-45.
- [27] 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.
- [28] 齐玉春, 董云社, 刘立新, 等. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3): 341-351.
- [29] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, 7(6): 373-378.
- [30] Sawamoto T, Hatano R, Yajima T, et al. Soil respiration in Siberian taiga ecosystems with different histories of forest fire [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(1): 31-42.
- [31] Kaye J P, McCulley R L, Burke I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(4): 575-587.
- [32] Hu R G, Kusa K, Hatano R. Soil respiration and methane flux in adjacent forest, grassland, and cornfield soils in Hokkaido, Japan [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2001, 47(3): 621-627.
- [33] 王庚辰, 杜睿, 孔琴心, 等. 中国温带典型草原土壤呼吸特征的试验研究 [J]. *科学通报*, 2004, 49(7): 692-696.
- [34] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains [J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(1): 15-23.
- [35] Cook F J, Orchard V A. Relationships between soil respiration and soil moisture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(5): 1013-1018.
- [36] Skopp J, Jawson M D, Doran J W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54(6): 1619-1625.
- [37] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响 [J]. *地理科学*, 1998, 18(5): 463-471.
- [38] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 21-51.