

周鹏翀, 沈莹, 许姣姣, 等. 长期定位耕作方式下冬小麦田根系呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 766-773.

ZHOU Peng-chong, SHEN Ying, XU Jiao-jiao, et al. Contribution of root respiration to soil respiration in a winter wheat field under long-term localized tillage[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 766-773.

长期定位耕作方式下冬小麦田根系呼吸对土壤呼吸的贡献

周鹏翀, 沈莹, 许姣姣, 韩惠芳*, 宁堂原, 李增嘉

(作物生物学国家重点实验室, 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学农学院, 山东 泰安 271018)

摘要:为探讨长期定位耕作方式对冬小麦田土壤呼吸以及根系呼吸的影响, 研究根系呼吸对土壤呼吸的贡献, 基于设在山东农业大学农学实验站的长期保护性耕作定位试验(始于2002年), 包括常规秸秆还田(PC)、免耕秸秆还田(PZ)、深松秸秆还田(PS)和旋耕秸秆还田(PR)4种处理, 采用静态箱法测定和分析麦田土壤呼吸及水热因子, 并利用根去除法研究根系呼吸对土壤呼吸的贡献。结果表明, 不同耕作方式下根系呼吸与土壤呼吸的变化趋势相同, 即在冬小麦整个生育期内, 土壤呼吸与根系呼吸速率均呈“低-高-低”的趋势。各处理之间的土壤呼吸速率差异显著, 与PC相比, PZ、PS、PR的土壤呼吸速率分别降低37.2%、17.0%、15.4%, PC、PZ、PR的根系呼吸速率较PS相比分别下降了9.4%、24.3%、22.4%。在冬小麦生育期内, 根系呼吸占土壤呼吸的比例呈双峰型, 比例波动为21.7%~82.0%, 均值为49.1%, 总体表现为PZ>PS>PR>PC。土壤呼吸与10 cm土层地温呈极显著正相关($P<0.01$), 而与土壤湿度未达到显著相关。研究表明, 与PC相比, 长期定位耕作方式中PZ和PS可以降低麦田的土壤呼吸速率, 减少麦田土壤的碳排放, 并且可以提高根系呼吸对土壤呼吸的贡献, 其中PS的根系呼吸速率最高, 更有利于作物的生长。

关键词:耕作方式; 冬小麦; 土壤呼吸; 根系呼吸

中图分类号: S153

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2019)06-0766-08

doi: 10.13254/j.jare.2018.0338

Contribution of root respiration to soil respiration in a winter wheat field under long-term localized tillage

ZHOU Peng-chong, SHEN Ying, XU Jiao-jiao, HAN Hui-fang*, NING Tang-yuan, LI Zeng-jia

(State Laboratory of Crop Biology, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Agro-nomic Sciences of Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: To investigate the effects of long-term localized tillage on soil respiration and root respiration, and to study the contribution of root respiration to soil respiration in a winter wheat field, the long-term conservation tillage positioning experiment (started in 2002) was set up based on the Agricultural Experimental Station of Shandong Agricultural University. There were four treatments, namely, PC (Residue present & conventional tillage), PZ (Residue present & zero tillage), PS (Residue present & subsoil tillage), and PR (Residue present & rotary tillage). The soil respiration dynamic changes and the soil hydrothermal factors using static closed chambers and the contribution of root respiration with method of root exclusion during the growth period of wheat were measured. Soil respiration showed the same trend as root respiration under the different tillage systems, that is, soil respiration and root respiration showed a trend of "low-high-low" during the whole growth period of winter wheat. There were significant differences in soil respiration rates among different treatments. Compared with PC, the soil respiration rate of PZ, PS, and PR decreased by 37.2%, 17.0%, and 15.4%, respectively. The root respiration rate of PC, PZ and PR decreased by 9.4%, 24.3% and 22.4%, respectively, compared with PS. The contribution rate of root respiration to soil respiration was bimodal, with a fluctuation of 21.7%~82.0% (mean value of 49.1%), which were ranked as PZ>PS>PR>PC, the soil respiration was

收稿日期: 2018-11-27 录用日期: 2019-03-07

作者简介: 周鹏翀(1996—), 男, 山东莱西人, 硕士研究生, 从事作物栽培与耕作研究。E-mail: 603424989@qq.com

*通信作者: 韩惠芳 E-mail: hhf@sdaa.edu.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503117); 国家自然科学基金项目(31771737, 31471453)

Project supported: Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503117); The National Natural Science Foundation of China (31771737, 31471453)

significantly positively correlated with soil temperature in 10 cm soil layer($P<0.01$) and was not significantly correlated with soil moisture. Compared with PC, PZ and PS reduced the soil respiration rate of the wheat field, reduced the carbon emission of the wheat field soil, and increased the contribution of root respiration to soil respiration. The root respiration rate of PS was the highest, and was more conducive to the growth of crops.

Keywords: tillage method; winter wheat; soil respiration; root respiration

农田土壤是陆地碳循环中最大的碳库,具有巨大的碳截获潜力^[1-2]。土壤呼吸是陆地植物固定CO₂后又释放CO₂返回大气的主要途径,也是土壤碳库和碳输出的主要途径^[3],李玉宁等^[4]指出,严格意义上的土壤呼吸是指受扰动的土壤产生CO₂的所有代谢作用,包括3个生物学过程(植物根系呼吸、微生物呼吸及土壤有机质分解和土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用),可以综合为两个过程:自养呼吸和异养呼吸。土壤根系呼吸属于自养呼吸,但很难把根际微生物呼吸和根系呼吸严格区分开,所以一般研究者把根际微生物呼吸和根系呼吸统称为根呼吸^[5],它受土壤温度、湿度、耕作方式等诸多因素的影响^[6-7]。土壤呼吸和根系呼吸的差别在于异养呼吸(微生物呼吸)释放的碳。因此,需要了解根系呼吸占土壤呼吸的比例,Hanson等^[8]通过对植物根系呼吸的研究发现,根系呼吸占土壤呼吸的比例为10%~90%,根系呼吸对土壤呼吸作用的贡献至关重要,因此区分土壤呼吸组分,可为明确土壤呼吸CO₂排放原理,更好地研究土壤碳获取和制定减排措施提供理论依据。

保护性耕作是具有社会、生态、经济环境等综合效益的农机化技术措施,成为现代农业发展的选择,已在部分地区得到推广^[9]。生态系统演替理论认为,在扰动的环境下单位生产量产生的呼吸量也较大,减少土壤呼吸的途径之一是减少耕作^[4]。有研究认为少耕、免耕较传统翻耕能降低土壤呼吸作用,减少CO₂的释放^[10]。目前,有关土壤呼吸的研究主要集中在不同耕作方式下排放通量、特征及影响因素方面^[11-13],有关根系呼吸及土壤呼吸的研究多集中在森

林、草原生态系统^[14-15],而对不同耕作方式下土壤呼吸组分的研究结果却不一致^[16-17],因此本试验基于长期保护性耕作农田,采用静态箱法与根去除法,对冬小麦农田的土壤呼吸、根系呼吸进行田间测定,从而获取农田生态系统土壤呼吸强度及根系呼吸对土壤呼吸的贡献,了解土壤呼吸与环境因子的相关关系,为今后开展农田生态系统碳循环研究以及寻求减缓农田碳排放的耕作方式提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2014年10月至2015年6月在山东农业大学农学实验站(117°09′13.79″~117°09′12.02″E, 36°09′30.78″~36°09′27.59″N)进行。属于温带大陆性季风气候区,光照充足,四季分明,采用小麦-玉米一年两熟种植模式。年均日照时数2 462.3 h,年平均气温13.6℃,年均降雨量786.3 mm,具有典型华北平原的气候特点。供试土壤为棕壤土,土层深厚,地下水位5 m以下。2014年冬小麦播种期前各处理耕层土壤基本性质见表1。

1.2 试验设计

本试验基于保护性耕作农田(始于2002年),在小麦/玉米一年两熟模式下进行,共设4个处理(表2),3次重复,试验采用随机区组排列,以PC为对照,每个小区的面积为4 m×30 m,供试小麦品种为济麦22,2014年10月12日播种,2015年6月10日收获,播种量90 kg·hm⁻²,行距20 cm。全年统一施肥,基肥折合纯N 160 kg·hm⁻²、P₂O₅ 150 kg·hm⁻²、K₂O 105 kg·hm⁻²,拔节期追施肥折合纯N 80 kg·hm⁻²,各处理小麦

表1 不同耕作方式土壤基本性质
Table 1 The soil basic characteristics of different tillage

处理 Treatments	有机碳 Soil organic C/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	速效氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	容重 Bulk density/ g·cm ⁻³
PC	10.29	1.22	110.67	7.85	38.44	1.43
PZ	15.85	1.94	119.53	9.91	42.37	1.52
PS	14.18	1.91	121.49	10.76	43.58	1.37
PR	12.94	1.71	115.13	8.32	40.25	1.45

表2 试验处理描述

Table 2 Treatment descriptions

处理 Treatments	还田方式 Returning methods	具体措施 Specific measures
PC	常规秸秆还田	小麦机械收获→秸秆全量还田→玉米免耕铁茬播种→玉米机械收获→秸秆旋茬粉碎全量还田→施底肥→圆盘耙灭茬→铧式犁翻耕(耕作深度 20~25 cm)→旋耕机旋耕→筑埂打畦→小麦机械播种
PZ	免耕秸秆还田	小麦机械收获→秸秆全量还田→玉米免耕铁茬播种→玉米机械收获→秸秆旋茬全量还田→施底肥→小麦机械播种
PS	深松秸秆还田	小麦机械收获→秸秆全量还田→玉米免耕铁茬播种→玉米机械收获→秸秆旋茬粉碎全量还田→施底肥→深松铲深松(耕作深度 35~40 cm)→小麦机械播种
PR	旋耕秸秆还田	小麦机械收获→秸秆全量还田→玉米免耕铁茬播种→玉米机械收获→秸秆旋茬粉碎全量还田→施底肥→圆盘耙耙地(耕作深度 12~15 cm)→小麦机械播种

拔节期浇水 60 mm,此后生育时期内不再灌水,其他管理措施同当地常规栽培。

1.3 测定项目与方法

分别于冬小麦苗期(2014年10月18日)、越冬期(2014年12月11日)、返青期(2015年3月6日)、拔节期(2015年4月2日)、抽穗期(2015年4月25日)、开花期(2015年5月9日)、灌浆期(2015年5月22日)、成熟期(2015年6月6日)进行各项目测定。

1.3.1 土壤呼吸的气体采集与测定

土壤呼吸气体测定从2014年10月小麦出苗后开始到2015年6月结束,每个生育时期测定1次,每次测定时间为上午9:00—11:00。土壤呼吸采用静态箱法测定,静态箱由玻璃纸制成,边角用PVC板加固,外层用隔热棉和反光膜包裹,箱内顶部设置轴流风扇。基座用PVC制作,高为30 cm,底部插入地下20 cm,基座上部设置水槽,用于气体检测时浇水密封。基座于小麦播种期放入,取样时将箱体罩在事先安好的基座上,测定之前将采样箱的底座埋入植株行间以保证箱内的气体不与大气进行气体交换,每个处理设3次重复。使用红外线气体分析仪分别于0、10、20、30 min测定CO₂浓度,并记录每次测定的时间,测定结束后尽快将采样箱移开,以减少采样活动对土壤环境和作物生长的影响。土壤呼吸CO₂排放通量是通过气体浓度随时间变化来计算单位面积的CO₂排放量。计算公式^[18]如下:

$$F=60 \times H \times M \times P / 8.314 \times (273+T) \times dc/dt$$

式中: F 为气体排放或吸收通量, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;常数60为将分钟转换为小时的换算系数; H 为静态箱有效高度,m; M 为气体的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; P 为测定时的大气压,Pa; T 为箱内平均温度, $^{\circ}\text{C}$; dc/dt 为气体浓度随时间变化的直线斜率。

1.3.2 土壤水热因子测定

测定气体的同时采用便携式温湿度仪(TDR)直

接测定,深度10 cm。

1.3.3 根系呼吸的测定

在各试验小区内选取人为干扰较小、空间分布相近的样方,每个样方面积为0.5 m×0.5 m,除去地表植被,用土铲按0~10、10~20、20~30、30~40 cm共4层将带根土壤取出,分别置于干净的塑料布上,在尽量不破坏土壤结构的前提下将明显的根系去除^[19]。

用50目的尼龙网包围土坑,在尼龙网内按照原来的土壤层次将去根土壤依次回填,定期观察样方内的变化,及时除去样方上的杂草,确保其不能在样方内生长成完整的根系^[20]。用静态箱法在样方内测定气体,该气体便可认为是自然状态下去根土壤的呼吸量。在样方外以同样的方式选取另一个样方去除地表植株,待干扰平衡后与无根样方同时进行气体测定,该气体量可认为是有根土壤的总呼吸量。

采用根去除法计算土壤呼吸中根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献,即将根区土壤呼吸速率减去非根区土壤呼吸速率视为根系呼吸速率,根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例即为根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献^[21]。

以上步骤中的CO₂均采用便携式红外线分析仪(ADC Bio. Scientific Ltd)测定。

1.4 数据处理

试验数据采用DPS 7.05和Microsoft Excel 2003进行统计分析,用LSD法进行多重比较($\alpha=0.05$),采用Sigma plot 10.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下土壤呼吸动态变化

冬小麦整个生育期内,土壤呼吸速率呈先下降后升高再下降的趋势,变化范围为0.08~0.98 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,最小值出现在越冬期的PS处理,最大值出现在开花期的PC处理(图1)。不同耕作方式下的土壤呼吸速

率差异显著,除返青期、拔节期、抽穗期三次测定中PS土壤呼吸速率高于对照外,其余时期均较低,PR、PS、PZ土壤呼吸速率较PC分别降低了14.8%、16.6%、37.0%,PZ可明显减弱土壤呼吸。

不同耕作方式各生育时期的土壤呼吸速率差异较大,在冬小麦越冬期土壤呼吸较弱,各处理差异不显著,从返青期开始土壤呼吸作用明显增强,在开花期达到最大值后逐渐降低,各处理之间差异明显。在冬小麦生长季,PC土壤呼吸速率最高,而PZ土壤呼吸速率最低。PC、PZ、PS、PR的平均土壤呼吸速率分别为0.54、0.34、0.45、0.46 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,表现为PC>PR>PS>PZ。

2.2 不同耕作方式下的土壤呼吸及组分

2.2.1 不同耕作方式下的根系呼吸速率

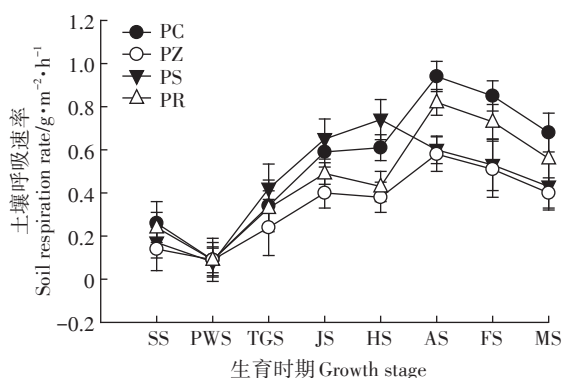
冬小麦根系呼吸速率与土壤呼吸速率变化相似,呈“低-高-低”的趋势,即前期根系呼吸较弱,返青期

至开花期根系呼吸迅速增强,之后又减弱(图2)。苗期根系吸收速率表现为PC>PR>PS>PZ;越冬期,PC最高,PZ、PS、PR差异不显著;开花期达到最大值,分别为PC 0.46 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、PZ 0.38 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、PS 0.54 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、PR 0.40 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,表现为PS>PC>PR>PZ;灌浆期至成熟期,PS、PR、PZ低于PC。

冬小麦生长季PC、PZ、PS和PR处理的平均根系呼吸速率分别为0.24、0.20、0.26 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和0.20 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其中PS的根系呼吸速率最高,PS较PC、PR、PZ分别上升了10.4%、32.1%、28.8%。

2.2.2 不同耕作方式下根系呼吸对土壤呼吸的贡献

土壤呼吸作用中根系呼吸所占比例呈双峰型,其中PS根系呼吸占土壤呼吸的比例在开花期最大,PZ在成熟期最大,PC、PR在越冬期最大(图3)。在冬小麦苗期,由于根系活性弱,微生物活性相对较强,根系呼吸占土壤呼吸的比例在不同耕作方式下的范围为21.7%~26.3%;随着温度的降低到越冬期土壤呼吸及微生物呼吸均达到生育期中的最小值,根系呼吸占土



SS:苗期Seedling stage;PWS:越冬期Pre-winter stage;TGS:返青期Turning green stage;JS:拔节期Jointing stage;HS:抽穗期Heading stage;AS:开花期Anthesis stage;FS:灌浆期Filling stage;MS:成熟期Maturity stage. 下同 The same below

图1 土壤呼吸动态变化

Figure 1 The dynamics change of the soil respiration

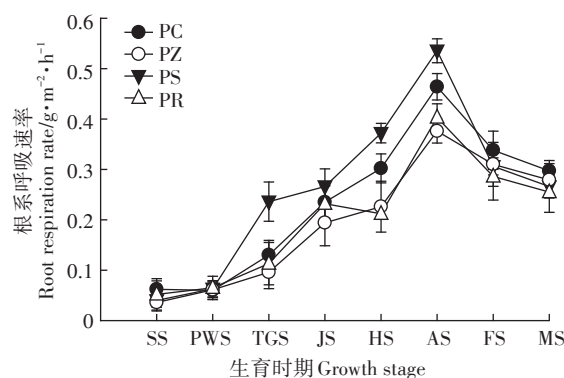
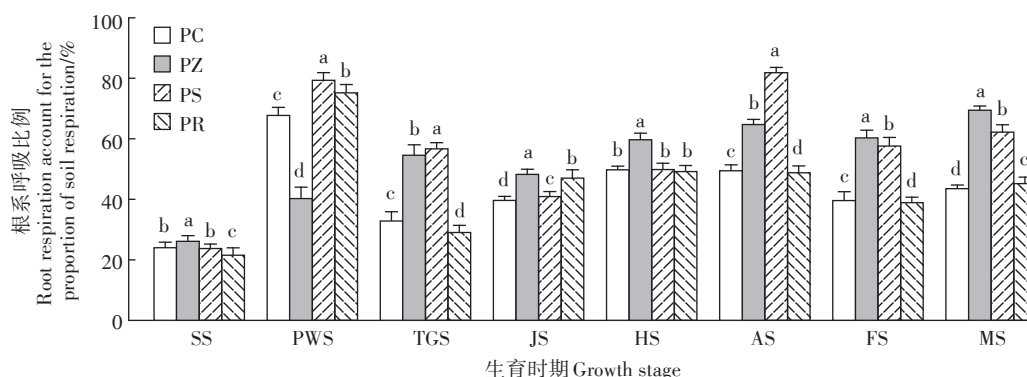


图2 根系呼吸动态变化

Figure 2 The dynamics change of the root respiration



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

图3 根系呼吸比例动态变化

Figure 3 The dynamics change in proportions of root to soil respiration

壤呼吸的比例在不同耕作方式下的范围为40.4%~79.5%;返青期以后,随着温度的升高,小麦根系生物量增大,根系呼吸增强,且微生物分解能力增强,根系呼吸和土壤呼吸逐渐上升;至开花期,根系呼吸占土壤呼吸的比例在不同耕作方式下的范围为48.9%~82.0%;后期由于根系活力变弱其呼吸也相对减少,根系呼吸占土壤呼吸的比例在不同耕作方式下的范围为39.0%~69.6%。因此,越冬期根系呼吸占土壤呼吸的比例仅次于开花期。

从表3可知整个生育期内,冬小麦根系呼吸占土壤呼吸的比例的平均值在PZ、PS、PR和PC处理下分别为56.2%、55.4%、42.5%和42.1%。4种耕作方式下各生育时期的根系呼吸贡献比例为21.7%~82.0%,其中冬小麦开花期根系呼吸贡献达82.0%,此时根系活力强,整个生长季4种耕作方式冬小麦根系呼吸占土壤呼吸的平均值为49.1%。不同耕作方式对土壤呼吸、微生物呼吸、根系呼吸的影响显著($P<0.05$),4种耕作方式下PZ处理土壤呼吸中根系呼吸的比例最高,而此条件下的微生物呼吸速率最低。PS根系呼吸速率最高,根系呼吸占土壤呼吸的比例低于PZ,但差异不显著。PC的土壤呼吸、微生物呼吸速率均显著高于其他耕作方式(表3)。

2.3 土壤呼吸与土壤温度、湿度的关系

2.3.1 土壤温度

由图4可知,0~10 cm土层的土壤温度在冬小麦生长季的变化趋势一致,均表现为先下降后上升,在开花期土壤温度最高,整个生长季PR、PZ、PC、PS的平均温度分别为26.4、26.1、25.1、24.8℃,其中PR温度最高。在苗期至拔节期PZ温度最高,PC最低;开花期,PR最高,PC最低;成熟期,PC最高,PS最低,且各处理间具有显著差异($P<0.05$)。

2.3.2 土壤湿度

由图5可知,0~10 cm土层的土壤湿度在冬小麦生长季的变化趋势一致,苗期至返青期土壤湿度降

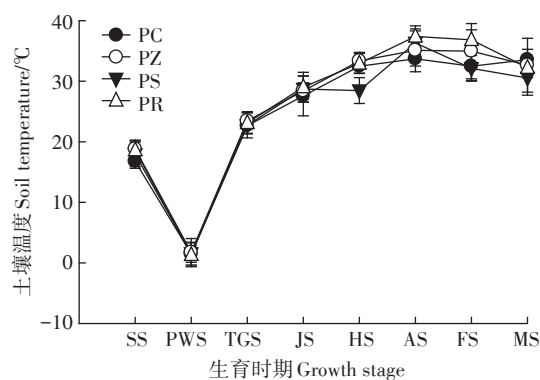


图4 0~10 cm土层土壤温度动态变化

Figure 4 The dynamic changes of soil temperature at 0~10 cm depth

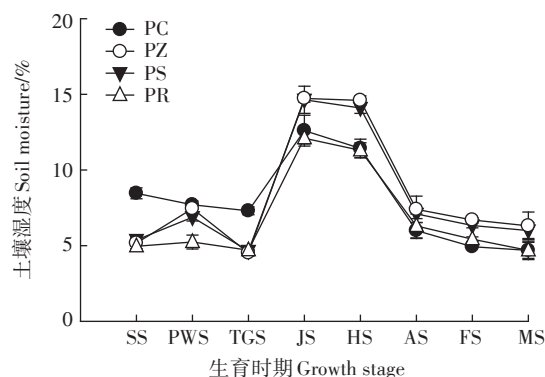


图5 0~10 cm土层土壤湿度变化

Figure 5 The dynamic changes of soil moisture at 0~10 cm depth

低,PZ、PS、PR、PC 4种耕作方式下返青期较苗期分别下降了12.6%、13.4%、5.2%、13.7%。由于浇拔节水使土壤湿度在拔节期达到最高值,随后逐渐下降直至稳定,PZ、PS、PR、PC处理成熟期较拔节期分别降低了57.2%、59.0%、61.2%、62.8%。整个冬小麦生长季平均土壤湿度表现为PZ>PS>PC>PR,PS、PC、PZ较PR分别提高了18.9%、22.2%、15.3%。

2.3.3 相关性分析

由表4可知,10 cm土层的土壤呼吸与土壤温度相关性极显著($P<0.01$),而与土壤湿度未达到显著相关。用10 cm土层地温分析土壤温度与土壤呼吸速率的

表3 耕作方式对土壤呼吸及组分的影响

Table 3 Effects of tillage methods on soil respiration and components of soil respiration

处理 Treatments	土壤呼吸速率 Soil respiration rate/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	根系呼吸速率 Root respiration rate/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	微生物呼吸速率 Microbial respiration rate/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	根系呼吸贡献 Contribution of root respiration/%
PC	4.35±0.14a	1.83±0.03b	2.48±0.15a	42.1±1.59b
PR	3.69±0.09b	1.57±0.01c	2.09±0.05b	42.5±1.32b
PS	3.61±0.03c	2.00±0.10a	1.56±0.04c	55.4±1.92a
PZ	2.74±0.21d	1.54±0.01d	1.12±0.07d	56.2±1.02a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

Note: The values are mean±SD; Different letters in the same column mean significant difference at $P<0.05$ level.

表4 土壤呼吸与土壤温度、湿度的相关性
Table 4 Correlation between soil respiration and soil temperature, moisture

处理 Treatments	10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth		10 cm 土壤湿度 Soil moisture at 10 cm depth	
	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient
PC	$Y=0.079\ 9e^{0.068\ 3x}$	0.90**	$Y=0.026\ 6x^2-0.478\ 2x+2.453\ 9$	-0.23
PZ	$Y=0.068\ 5e^{0.055\ 6x}$	0.89**	$Y=-0.004\ 9x^2+0.109\ 6x-0.150\ 3$	0.24
PR	$Y=0.073\ 4e^{0.065\ 4x}$	0.83**	$Y=0.002\ 4x^2-0.010\ 9x+0.343\ 7$	0.64
PS	$Y=0.077\ 9e^{0.059\ 9x}$	0.90**	$Y=-0.038\ 6x^2+0.660\ 1x-1.959$	0.15

注:*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$ 。
Note:*indicates $P<0.05$,**indicates $P<0.01$.

指数函数关系,结果表明,不同耕作方式下土壤温度与土壤呼吸速率相关性依次为PC>PS>PZ>PR。土壤湿度与土壤呼吸速率相关性依次为PR>PC>PZ>PS。

3 讨论

3.1 不同耕作方式对土壤呼吸的影响

耕作方式对农田土壤呼吸速率有显著的影响^[22]。很多研究的结果表明,传统的耕作方式下土壤的呼吸速率显著高于相应的免耕土壤^[23]。也有研究发现,深松的土壤呼吸速率高于翻耕^[24]。本研究中4种耕作方式下的土壤呼吸在冬小麦季变化趋势一致,平均土壤呼吸速率大小顺序为PC>PR>PS>PZ,保护性耕作均减弱了土壤呼吸。因为耕翻降低土壤紧实度,增加土壤的通透性,导致土壤有机碳的大量损失,CO₂释放量增加^[25],而免耕可以提高表土层微生物活性和微生物量碳,有明显的“上富下贫”现象,对中下层土扰动程度较小,延长有机质分解时间,在一定程度上减缓土壤CO₂排放,减弱土壤呼吸强度^[26]。耕翻会加大对土壤的扰动程度,使土壤的通气性增强,促进有机质的分解^[27],为土壤微生物的活动提供能源物质,加速微生物的活动,间接影响土壤中CO₂的排放,为其提供释放的条件。

3.2 土壤呼吸与土壤水热条件的相关性

土壤呼吸作用的影响因素众多,水热因子、作物生物学特性、农业管理措施及人为因素等均是造成我国农田生态系统土壤呼吸作用时空变异的主要因素^[28]。土壤呼吸受根系呼吸和微生物呼吸共同影响,而温度升高可以促进根系呼吸,使土壤中的有机质快速分解,提高微生物活性,从而使土壤表层的CO₂含量增加,增强表面的释放量^[29]。温度的变化也会影响作物的光合作用,在一定范围内,温度越高,光合作用越强,进而使作物的土壤呼吸也变强。相关研究表明,玉米秸秆还田于小麦田后,土壤呼吸与20 cm土

层土壤温度和有机碳含量呈显著正相关,与土壤湿度在一定范围内呈正相关,而土壤达到一定湿度后呈负相关^[18]。研究表明土壤呼吸与土壤湿度呈显著正相关,而与温度没有显著相关性^[30]。还有研究表明土壤含水量与土壤呼吸之间的相关性不明显^[31]。本试验研究结果表明10 cm土层土壤温度与土壤呼吸的拟合方程为指数函数,且达极显著正相关,但土壤湿度与土壤呼吸的相关系数并未达到显著水平,说明此条件下0~10 cm土层的土壤湿度对土壤呼吸的影响不大。关于对土壤湿度与土壤呼吸的关系的研究结果存在差异,这与测定条件、土壤性状等有关,因此在本试验条件下还需连续观测来准确判断土壤湿度与土壤呼吸的关系。

3.3 不同耕作方式下根系呼吸作用对土壤呼吸作用的贡献

农田生态系统中根系呼吸对土壤呼吸的贡献为48%±5%^[32],本试验采用根去除法测得的不同耕作方式下小麦各生育时期根系呼吸占土壤呼吸的比例为21.7%~82.0%,平均值为49.1%,这与张宇等^[16]获得的小麦整个生育时期根系呼吸占土壤呼吸的比例基本一致。其中PZ处理的土壤呼吸和微生物呼吸速率最低,PS处理的根系呼吸速率最高,PC的根系呼吸对土壤呼吸的贡献最低,原因为耕作越深,越有利于植物根系下扎,促进作物根系生长从而增加根系呼吸速率。耕翻深度增加了土壤基础呼吸,从而降低了根系呼吸占土壤呼吸的比例。PZ条件下微生物活性低,不利于有机质矿化分解,而PC与PZ相反。PC、PZ、PS、PR在温度上的差异会导致微生物的活性不同,影响土壤有机质的矿化分解,从而影响碳排放。

4种耕作方式下,根系呼吸作用对土壤呼吸作用的贡献在开花期为48.9%~82.0%,在苗期最小,变化范围为21.7%~26.3%。主要原因是一方面苗期土壤原有的有机质经过耕作后大量分解,使微生物呼吸增

强,从而使得根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献减小;另一方面苗期植株根系比较弱小,因而根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献较小。在越冬期,根系呼吸比例变化范围为40.4%~79.5%,根系呼吸贡献增大,可能原因是温度降低,微生物的呼吸接近于零,此时的呼吸基本来自于根系呼吸;在开花期,小麦处于营养生长与生殖生长并进阶段,根系生物量迅速增加,进而刺激了根系的呼吸作用;小麦生长后期,根系呼吸比例变化范围为39.0%~69.6%,根系活力降低,进而降低了根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例^[33]。

本试验是在长期保护性耕作农田进行,但对不同耕作方式对土壤呼吸及组分的影响研究时间较短,还需要长期的试验。根去除法研究过程中由于裸地无植株,其对养分和水分的吸收势必与原处理土壤不同,造成二者温湿度差异,使得裸地测定得到的微生物呼吸存在偏差,进而影响根系呼吸占整个土壤呼吸比例的计算结果^[24],因此,本试验为减少这种误差,在4个处理的作物行间选取较小面积进行测定,但依然会有误差存在。同时应做好与外部根系的隔离,避免外来根系的侵入影响测定结果。因此在后续研究中应及时去除或切断外来根系,区分裸地和原处理之间温湿度的差异对土壤呼吸的影响。

4 结论

(1)冬小麦整个生育期农田土壤呼吸呈先减弱再增强又降低的变化趋势,越冬期最低,开花期最高,不同耕作方式下的土壤呼吸速率差异显著,总体上表现为PC>PR>PS>PZ。PZ、PS、PR与PC相比均能降低土壤呼吸,其中PZ降低幅度最大。

(2)土壤呼吸与10 cm土壤温度呈极显著正相关,而与土壤湿度未达到显著相关。

(3)冬小麦整个生育期根系呼吸与土壤呼吸呈同样的变化趋势,不同耕作方式下的根系呼吸速率差异显著,总体上表现为PS>PC>PR>PZ, PZ、PS、PR、PC根系呼吸比例分别为56.2%、55.4%、42.5%、42.1%,各生育时期的根呼吸贡献比例范围为21.7%~82.0%,平均值为49.1%,总体上表现为PZ>PS>PR>PC。不同耕作方式下冬小麦各生育时期根系呼吸所占比例不同,因此定量分析根系呼吸对土壤呼吸的贡献,可为研究土壤碳平衡提供理论基础。

参考文献:

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and

- food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [2] 黄承才, 葛滢, 常杰, 等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(3):36-40.
HUANG Cheng-cai, GE Ying, CHANG Jie, et al. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3):36-40.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):7-20.
- [4] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2):351-357.
LI Yu-ning, WANG Guan-yu, LI Wei. Soil respiration and carbon cycle[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2):351-357.
- [5] 陈宝玉, 王洪君, 杨建, 等. 土壤呼吸组分区分及其测定方法[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(1):96-99.
CHEN Bao-yu, WANG Hong-jun, YANG Jian, et al. Separation of soil respiration components and method for measuring soil respiration[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(1):96-99.
- [6] 陈素英, 胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究[J]. *生态农业研究*, 1997, 5(2):44-48.
CHEN Su-ying, HU Chun-sheng. Soil respiration rate of farmland ecosystem in Taihang piedmont[J]. *Eco-Agriculture Research*, 1997, 5(2):44-48.
- [7] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因素的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6):680-686.
LI Ling-hao, WANG Qi-bing, BAI Yong-fei, et al. Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River basin as affected by over-grazing and climate[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(6):680-686.
- [8] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):115-146.
- [9] 王长生, 王遵义, 苏成贵, 等. 保护性耕作技术的发展现状[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(1):167-169.
WANG Chang-sheng, WANG Zun-yi, SU Cheng-gui, et al. Development and application of protective farming technique[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(1):167-169.
- [10] 姜勇, 梁文举, 闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3):347-351.
JIANG Yong, LIANG Wen-ju, WEN Da-zhong. Effects of no-tillage on biological characteristics of farmland soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3):347-351.
- [11] 潘莹, 胡正华, 吴杨周, 等. 保护性耕作对后茬冬小麦土壤CO₂和N₂O排放的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(7):2771-2776.
PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, et al. Effects of conservation tillage on soil CO₂ and N₂O emission during the following winter-wheat season[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7):2771-2776.
- [12] 陈玲, 范会, 蒋静艳. 不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和N₂O排放的关系[J]. *环境科学*, 2014, 35(8):3102-3109.
CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan. Soil biochemical characteristics in different ecological systems and their relationships with soil respiration and N₂O emission[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8):3102-3109.
- [13] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田CO₂排放影响及水热关系分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4):47-53.

- ZHANG Yu, ZHANG Hai-lin, CHEN Ji-kang, et al. Effects of different tillage practices on CO₂ emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4):47-53.
- [14] 张宪权, 王文杰, 祖元刚, 等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性[J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(2):46-47.
- ZHANG Xian-quan, WANG Wen-jie, ZU Yuan-gang, et al. The difference between different components of soil respiration in several types of forests in northeastern China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(2):46-47.
- [15] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 北亚热带-南温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离[J]. 生态学报, 2007, 27(5):1791-1802.
- CHANG Jian-guo, LIU Shi-rong, SHI Zuo-min, et al. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1791-1802.
- [16] 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.
- ZHANG Yu, ZHANG Hai-lin, CHEN Ji-kang, et al. Tillage effects on soil respiration and contributions of its components in winter wheat field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9):3354-3360.
- [17] Francisco J M, Whitmore A P, Alvaro-Fuentes J, et al. Root respiration of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Field and modelling approaches[J]. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2):135-147.
- [18] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5):1374-1380.
- WANG Bing-wen, CHI Shu-yun, TIAN Shen-chong, et al. Effects of different maize straw-returning modes on the soil respiration in a winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5):1374-1380.
- [19] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4):597-602.
- CHENG Shen-yu, ZHANG Xian-zhou. Methods and application of root and microbial respiration in soil respiration[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4):597-602.
- [20] 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞. 土壤各组分呼吸区分方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2003, 22(2):65-69.
- YI Zhi-gang, YI Wei-min, ZHOU Li-xia. Advances in the research on the methods for separating the components of soil respiration[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(2):65-69.
- [21] 禄兴丽, 廖允成. 不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(6):2266-2273.
- LU Xing-li, LIAO Yun-cheng. Effects of tillage on soil respiration and root respiration under rain-fed summer corn field[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6):2266-2273.
- [22] 江晓东, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 少免耕模式对土壤呼吸的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2):253-256.
- JIANG Xiao-dong, CHI Shu-yun, NING Tang-yuan, et al. Effects of minimum tillage and no-tillage patterns on soil respiration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2):253-256.
- [23] 翟洋洋, 程云湘, 常生华, 等. 干旱地区农田生态系统土壤温室气体排放机制[J]. 中国农学通报, 2014, 31(9):231-236.
- ZHAI Yang-yang, CHENG Yun-xiang, CHANG Sheng-hua, et al. Mechanism of greenhouse gas emission from agro-ecosystem soil in arid regions[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 31(9):231-236.
- [24] 张俊丽, Tanveer S K, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):192-199.
- ZHANG Jun-li, Tanveer S K, WEN Xiao-xia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(18):192-199.
- [25] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用DNDC模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤N₂O释放的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6):917-922.
- XU Wen-bin, LIU Wei-ping, LIU Guang-shen. Potential effect of fertilising and tilling on N₂O emission from upland soils analyzed by DNDC model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6):917-922.
- [26] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6):1765-1771.
- LI Xiao-sha, WU Ning, LIU Ling, et al. Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6):1765-1771.
- [27] Al-Kaisi M M, Yin X, Licht M A. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 105(4):635-647.
- [28] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10):1698-1705.
- HAN Guang-xuan, ZHOU Guang-sheng, XU Zhen-zhu. Temporal variation of soil respiration and its affecting factors in a maize field during maize growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10):1698-1705.
- [29] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 土壤微生物与根系呼吸作用影响因素分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8):1547-1552.
- JIA Bing-rui, ZHOU Guang-sheng, WANG Feng-yu, et al. Affecting factors of soil microorganism and root respiration[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 16(8):1547-1552.
- [30] 孟祥力, 陈世苹, 魏龙, 等. 库布齐沙漠油蒿灌丛土壤呼吸速率时空变异特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(4):1152-1158.
- MENG Xiang-li, CHEN Shi-ping, WEI Long, et al. Temporal and spatial variations of soil respiration in an *Artemisia Ordosica* shrubland ecosystem in Kubuqi desert[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(4):1152-1158.
- [31] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux: A modified model[J]. *Plant and Soil*, 2005, 268(1):21-33.
- [32] Skopp J, Jawson M D, Doran J. Wasted-state aerobic microbial activity as function of soil water content[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1990, 54:1619-1625.
- [33] 寇太记, 徐晓峰, 朱建国, 等. CO₂浓度升高和施氮条件下小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10):2533-2538.
- KOU Tai-ji, XU Xiao-feng, ZHU Jian-guo, et al. Contribution of wheat rhizosphere respiration to soil respiration under elevated atmospheric CO₂ and nitrogen application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2533-2538.