

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0620

张晓雨,张赛,王龙昌,等.2014.秸秆覆盖条件下小麦生长季根系呼吸对土壤呼吸作用的贡献[J].环境科学学报,34(11):2846-2852

Zhang X Y, Zhang S, Wang L C, et al. 2014. Contribution of root respiration to soil respiration based on straw mulching in wheat growing season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(11): 2846-2852

## 秸秆覆盖条件下小麦生长季根系呼吸对土壤呼吸作用的贡献

张晓雨,张赛,王龙昌\*,周航飞,贾会娟,黄召存,罗海秀

西南大学农学与生物科技学院,三峡库区生态环境教育部重点实验室,南方山地农业教育部工程研究中心,重庆 400716

收稿日期:2013-12-31 修回日期:2014-02-16 录用日期:2014-02-16

**摘要:**在紫色土丘陵区连续 6 年进行秸秆覆盖试验的“早三熟”农田系统中,于 2012 年 12 月—2013 年 4 月小麦生长季内对土壤呼吸进行测定,并对小麦根系生物量、土壤温度、土壤水分和土壤有机碳含量等指标进行监测,以分析土壤呼吸动态变化的影响因素.结果表明,秸秆覆盖措施显著提高了土壤呼吸速率,秸秆覆盖(S)和秸秆覆盖+腐熟剂(SD)处理分别比对照(CK)增加了 45.0%和 29.4%.曲线估计表明,土壤呼吸作用与根系生物量呈显著线性关系,通过建立二者的线性回归方程,采用生物量外推法估算小麦根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例,在分蘖期(2012 年 12 月)、拔节期(2013 年 1 月)、抽穗期(2012 年 3 月)和灌浆期(2013 年 4 月),根系呼吸分别占土壤呼吸的 28.2%、44.0%、56.9%、56.2%,平均贡献为 46.3%,并呈先增加再降低的趋势,在抽穗期达到最大,与根系生物量的变化同步.按照不同处理建立根系生物量与土壤呼吸间的线性回归方程,经计算得出 CK、S 和 SD 3 个处理中,根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例分别为 42.9%、43.8%和 43.7%,秸秆覆盖对根系呼吸作用比例无显著影响.

**关键词:**土壤呼吸;秸秆覆盖;根系生物量外推法;小麦根系呼吸

文章编号:0253-2468(2014)11-2846-07 中图分类号:X53 文献标识码:A

## Contribution of root respiration to soil respiration based on straw mulching in wheat growing season

ZHANG Xiaoyu, ZHANG Sai, WANG Longchang\*, ZHOU Hangfei, JIA Huijuan, HUANG Zhaocun, LUO Haixiu

College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education /Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Chongqing 400716

Received 31 December 2013; received in revised form 16 February 2014; accepted 16 February 2014

**Abstract:** In a dryland with triple intercropping system and 6-year straw mulching experiment in purple hilly region of southwest China, the soil respiration was measured, and the biomass of wheat root, soil temperature, soil moisture and soil organic carbon content were monitored during the growing season of wheat (December 2012 to April 2013), so as to analyze the factors influencing soil respiration dynamics. The results showed that straw mulching could significantly improve the rate of soil respiration. Compared to the control (CK), the treatments of straw mulching (S) and straw mulching + decomposing inoculant (SD) increased soil respiration by 45.0% and 29.4%, respectively. Curve estimation revealed that there was significant linear relationship between soil respiration and root biomass. The equation of liner regression was constructed between soil respiration and root biomass, and the contribution of root respiration to soil respiration was estimated by the method of Root Biomass Extrapolation. At the tillering (Dec 2012), shooting (Jan. 2013), heading (Mar. 2013) and filling (Apr. 2013) stages of wheat, the root respiration accounted for 28.2%, 44.0%, 56.9% and 56.2%, respectively, of soil respiration, and the average contribution was 46.3%. The trend of proportion of root respiration was increasing firstly, peaking at the heading stage of wheat and then decreasing, which was synchronous with the change of root. The linear regression between root biomass and soil respiration was established for different treatments, which showed that the contribution rate of wheat root to soil respiration in CK, S and SD was 42.9%, 43.8% and 43.7%, respectively. Straw mulching had no significant effect on the proportion of root respiration.

**Keywords:** soil respiration; straw mulching; root biomass extrapolation; root respiration of wheat

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.31271673,30871474);重庆市科技攻关项目(No.CSTC,2008AB1001)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China(No.31271673,30871474) and the Key Project of Science and Technology of Chongqing City(No.CSTC,2008AB1001)

**作者简介:** 张晓雨(1985—),男,E-mail:zhangxy0729@163.com; \* 通讯作者(责任作者),E-mail:wangle2003@163.com

**Biography:** ZHANG Xiaoyu(1985—), male, E-mail:zhangxy0729@163.com; \* **Corresponding author**, E-mail:wangle2003@163.com

## 1 引言 (Introduction)

据统计, 全球土壤碳贮量约为 1400 Pg (Jenkinson *et al.*, 1991), 是一个巨大的碳库。土壤呼吸是生态系统碳循环的重要组成部分, 占全球碳排放量的 25% (Buchmann, 2000), 全球每年由土壤向大气释放的碳为 68 Pg, 仅次于全球总初级生产力 (相当于碳量  $100 \sim 120 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 超过全球陆地生态系统的净初级生产力 (相当于碳量  $50 \sim 60 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ ) (Raich *et al.*, 1992)。因此, 土壤呼吸即使发生微小的变化, 也会对全球碳循环, 特别是对大气  $\text{CO}_2$  浓度的变化产生重大影响。为了精确估算生态系统中  $\text{CO}_2$  的动态过程, 必须对自养呼吸作用和异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例进行量化 (Larionova *et al.*, 1998)。严格意义上的土壤呼吸是指受扰动的土壤产生  $\text{CO}_2$  的所有代谢作用 (Lundegårdh *et al.*, 1927), 包括 3 个生物学过程和一个非生物学过程。生物学过程包括植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸, 非生物学过程是指含碳物质的化学氧化作用 (Singh *et al.*, 1977)。一般认为, 在土壤呼吸中以植物根系呼吸和土壤微生物呼吸为主。

研究表明, 保护性耕作有利于土壤碳固定, 减少温室气体排放, 通过改变农业管理措施、耕作措施和农业投入而使农田生态系统中土壤碳含量提高, 同时减少  $\text{CO}_2$  向大气中的释放 (Bayer *et al.*, 2007; Blanco-Canqui *et al.*, 2008; 张国盛等, 2008)。秸秆覆盖还田作为一项重要的保护性耕作措施, 具有除草效果, 且能增加土壤生物多样性, 更重要的是能将作物中的部分碳固定到土壤中, 在减少向大气释放  $\text{CO}_2$  的同时培肥地力, 是一项一举多得的措施。因此, 秸秆还田是当前乃至今后秸秆资源利用的主渠道 (Doran *et al.*, 2001; 刘巽浩等, 2001)。

土壤根系呼吸分离测定在森林和草原生态系统研究较多, 而关于农田生态系统的报道相对较少。植物根系呼吸的分离测定方法有多种, 根据国内外近年来的研究总结, 常用方法有如下几种: 组分综合法、根系分离测定法、根生物量外推法、根排除法、树干环剥法、同位素标记法 (唐罗忠, 2008; 程慎玉等, 2003)。综合考虑精确性、可操作性及费用问题, 本研究在实施多年秸秆还田的旱作农田, 采用根系生物量外推法估算小麦在不同生长阶段和不同土壤处理条件下根系呼吸占土壤呼吸的比例, 并分析土壤温湿度、碳含量与土壤呼吸之间的相关性。

旨在解决以下两个问题: ①采用生物量外推法估算小麦根系呼吸对土壤呼吸作用的贡献; ②秸秆覆盖对土壤呼吸及根系呼吸的影响。

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 试验设计

试验地位于重庆市北碚区西南大学教学实验农场 ( $29^{\circ}51'N$ ,  $106^{\circ}27'E$ , 海拔 244 m), 属亚热带风湿润气候, 年均太阳总辐射量  $87108 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 年均总日照时数 1276.7 h, 多年平均气温  $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  积温  $5979.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 夏季最高气温达  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 无霜期达 359 d, 多年平均降雨量 1133.7 mm。试验地土壤为旱地紫色土, 坡度较缓, 地力相对均匀。土壤容重  $1.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , pH 为 6.47, 土壤有机质  $28.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $1.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $34.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $18.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $170.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $35.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验采用“小麦/玉米/大豆”三熟复种轮作模式, 试验地已连续 6 年开展早三熟种植模式下的保护性耕作研究, 每年的耕作处理保持一致。共设 3 个处理, 3 次重复: ①对照 (CK), 整个试验期无秸秆还田; ②秸秆覆盖 (S), 整个试验期采用秸秆覆盖, 收获的小麦、玉米、大豆秸秆全量就地覆盖; ③秸秆覆盖+腐熟剂 (SD), 在处理②的基础上覆盖秸秆时加入 EM 秸秆腐熟剂。试验采用随机区组排列, 每个小区的面积为  $(8.0 \times 3.6) \text{ m}^2$ 。每个小区均分 4 厢, 每厢宽度为 2.0 m, 长度为 3.6 m。每厢均分两个条带, 相邻两条带种植不同作物。本试验供试作物为小麦 (糯小麦品系, 播种量  $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 2012 年 11 月 25 日播种, 2013 年 4 月 20 日收获, 各处理均施过磷酸钙  $390 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素  $152 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 作为基肥在播种时施入。覆盖处理所用的小麦、玉米及大豆秸秆, 收获后均匀覆盖于小区内, 小麦播种前覆盖大豆秸秆, 每小区覆盖秸秆  $42.7 \text{ kg}$  (折合  $15000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。腐熟剂处理中, 腐熟剂剂量为秸秆量的 0.2%。田间管理措施同常规。

### 2.2 测定指标与方法

#### 2.2.1 土壤呼吸测定

土壤呼吸采用 Li-6400 便携式气体分析系统 (Li-cor, Lincoln, NE, USA) 和 Li-6400-09 土壤呼吸室测定, 于 2012 年 12 月—2013 年 4 月小麦苗期到收获期分 4 次测定, 每次测定时间均为上午 9:00—11:00。测定前 1 天在每一重复的行间和条带间随机选取 4 个点, 将自制的 PVC 土环

插入土壤中 2 cm,地上露出 5 cm 左右,土环距植株 5~10 cm.在土壤呼吸测定的同时采用土壤热电偶探针(LI26400209TC, LiCor, 美国)测定土环附近 10 cm 处的土壤温度.

**2.2.2 土壤水分及有机碳测定** 每次测定土壤呼吸后,在土环附近取表层土壤(0~10 cm),用于测定土壤水分及土壤有机碳含量.土壤水分采用干燥恒重法测定,土壤有机碳采用 TOC-L(岛津)有机碳测定仪进行测定.

**2.2.3 根系生物量测定** 冬小麦根系分布主要集中在 80 cm 以上土层,其中,5~10 cm 根系生物量最大,且随土层深度增加,根系密度呈指数下降(王淑芬等,2006;刘荣花等,2008);同时,20 cm 土层普遍被认为是主要耕层土壤,所以本研究在测定土壤呼吸后,用直径 10 cm、深度 20 cm 的根钻在每个土环中取出土壤圆柱.用水冲洗土壤圆柱并过筛,挑选出小麦根系,80 °C 下烘干至恒重后称重.

**2.2.4 根系呼吸计算** 采用根系生物量外推法计算,即选择一系列根系生物量差异尽可能大的不同样点,对土壤呼吸总量和相应呼吸面积下根系生物量进行测定,获得两者之间的相关关系,外推到根系生物量为零时的土壤呼吸速率即是土壤净呼吸速率.根系呼吸为土壤净呼吸基础上的净增加值(唐罗忠,2008;程慎玉等,2003),三者关系如下:

$$R_t = R_r + R_m$$

式中, $R_t$ 为土壤呼吸总量( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $R_r$ 为根系呼吸速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $R_m$ 为净(微生物)呼吸速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

### 2.3 统计分析

土壤呼吸作用在不同时段的差异性采用一维方差(one-way ANOVA)分析;运用相关分析法分析水热因子、土壤有机碳含量、根系生物量与土壤呼吸作用之间的关系;土壤呼吸作用与根系生物量之间进行回归分析.所有的数据分析基于统计分析软件 SPSS19.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 和 Excel2007 完成.

## 3 结果与分析(Results and analysis)

### 3.1 土壤呼吸动态变化及影响因素分析

由图 1 可知,在小麦生长季内,对照(CK)、秸秆覆盖(S)和秸秆覆盖+腐熟剂(SD)3 个处理中土壤呼吸速率均呈先增加再降低的趋势,在抽穗期达到最大值;在小麦生长前期(分蘖期到拔节期),SD 处

理与 CK 之间表现出显著差异,而在拔节期以后 S、SD 与 CK 之间均表现出显著差异;在整个小麦生长季内,CK 处理土壤呼吸速率在  $0.4\sim 1.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之间,均值为  $1.09 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;S 处理土壤呼吸速率在  $0.6\sim 2.3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之间变化,均值为  $1.58 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;而 SD 处理土壤呼吸速率在  $0.8\sim 2.0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  之间变化,均值为  $1.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .S 和 SD 处理的土壤呼吸速率均值分别比 CK 增加了 45.0% 和 29.4%.SD 处理在前期明显增强土壤呼吸作用,到后期土壤呼吸速率反而低于 S 处理区.可能由于添加秸秆腐熟剂后微生物活动明显增强,提高了秸秆腐解速度,比 S 处理提前达到腐解极限,到后期由于营养比例失调等原因微生物活动相比 S 区较低,土壤呼吸速率也低于 S 区.

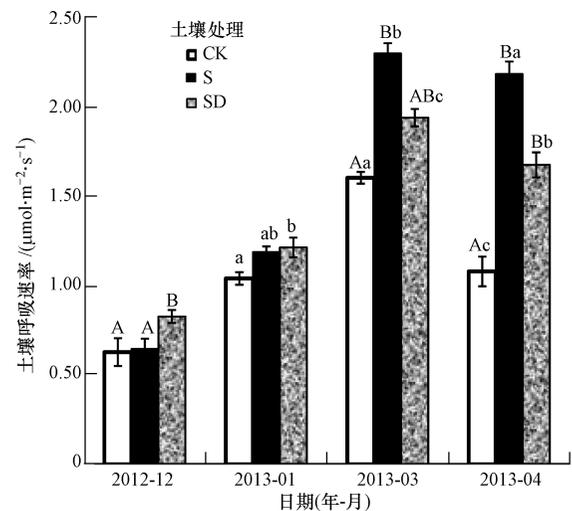


图 1 土壤呼吸动态变化图(小写字母表示不同处理间显著差异( $p < 0.05$ ),大写字母表示极显著差异( $p < 0.01$ ))

Fig.1 Dynamic changes of soil respiration (Small and capital letters mean significant difference between different treatments at  $p < 0.05$  and  $p < 0.01$ , respectively)

在土壤呼吸速率的各影响因素中(表 1),根系生物量在整个小麦生长季内与土壤呼吸作用显著

表 1 土壤呼吸速率与影响因素之间的相关关系

Table 1 Correlation coefficients between soil respiration rate and influencing factors

日期	$r$			
	0~10 cm 土壤水分	10 cm 土壤温度	根系生物量	土壤有机碳含量
2012-12-23	-0.030	0.319	0.516**	0.467**
2013-1-24	-0.065	0.132	0.723**	0.070
2013-3-3	0.085	0.387	0.819**	0.538**
2013-4-1	-0.126	0.045	0.588**	0.263

注: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ .

正相关( $p < 0.01$ ); 而温度、湿度在短时间内对土壤呼吸的影响不显著; 土壤有机碳含量与土壤呼吸的相关性不稳定, 在小麦分蘖期和抽穗期两者极显著正相关, 而在拔节期和灌浆期均无显著相关性. 可见在小麦生长季这一较短时段内, 根系生物量是土壤呼吸动态变化的主要影响因子.

### 3.2 根系呼吸对土壤呼吸总量的贡献

#### 3.2.1 不同时期根系呼吸占土壤呼吸的比例

通过对土壤呼吸速率和根系生物量进行回归分析, 建立两者之间的线性回归方程(图 2). 在小麦生长季内, 根系生物量分别解释了不同生长阶段土壤呼吸速率差异的 24.2% (2012 年 12 月 23 日, 分蘖期)、50.7% (2013 年 1 月 24 日, 拔节期)、65.4% (2013 年 3 月 3 日, 抽穗期) 和 31.0% (2013 年 4 月 1 日, 灌浆期).

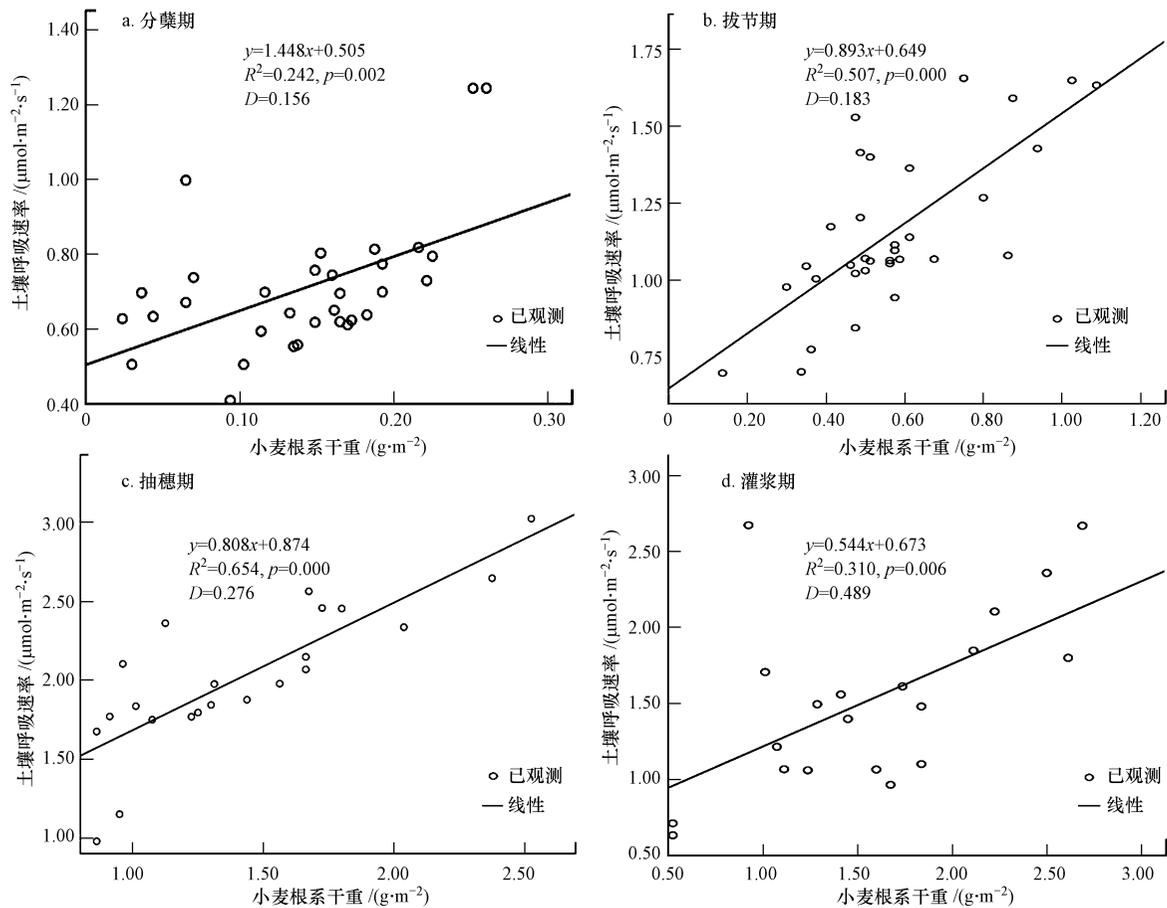


图 2 小麦不同生育期根系生物量与土壤呼吸的回归分析( $D$  为标准估计的误差)

Fig.2 Regression analysis about root biomass and soil respiration at different stages of wheat development

采用根系生物量外推法计算出土壤呼吸总量 ( $R_m$ ) 及根系呼吸作用比例 (表 2). 小麦分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期 4 个时段根系呼吸速率分别

表 2 小麦生长季中根系呼吸占土壤呼吸的比例

Table 2 Contribution of root to soil respiration during the growing season of wheat in 2012—2013

日期	土壤呼吸速率 $R_t / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	微生物呼吸速率 $R_m / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	根系呼吸速率 $R_r$ $/ (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	根系呼吸 作用比例
2012-12-23	$0.71 \pm 0.030$	0.51	0.20	28.2%
2012-1-24	$1.16 \pm 0.044$	0.65	0.51	44.0%
2013-3-3	$2.02 \pm 0.078$	0.87	1.15	56.9%
2013-4-1	$1.53 \pm 0.098$	0.67	0.86	56.2%

为 $0.20$ 、 $0.51$ 、 $1.15$ 、 $0.86 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .在小麦生长季中,根系呼吸速率在 $0.2\sim 1.2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间变化,波动较大,而土壤微生物呼吸作用的波动较小( $0.5\sim 0.9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).根系呼吸占土壤呼吸作用的比例呈单峰型变化,在抽穗期达到最高值,在小麦各生长阶段分别为 $28.2\%$ 、 $44.0\%$ 、 $56.9\%$ 、 $56.2\%$ ;随着小麦根系生物量的增加而增加,平均值为 $46.3\%$ ;在小麦发育后期,土壤呼吸速率开始下降,根系呼吸占土壤呼吸的比例不再增加,可能与根系衰老有关.

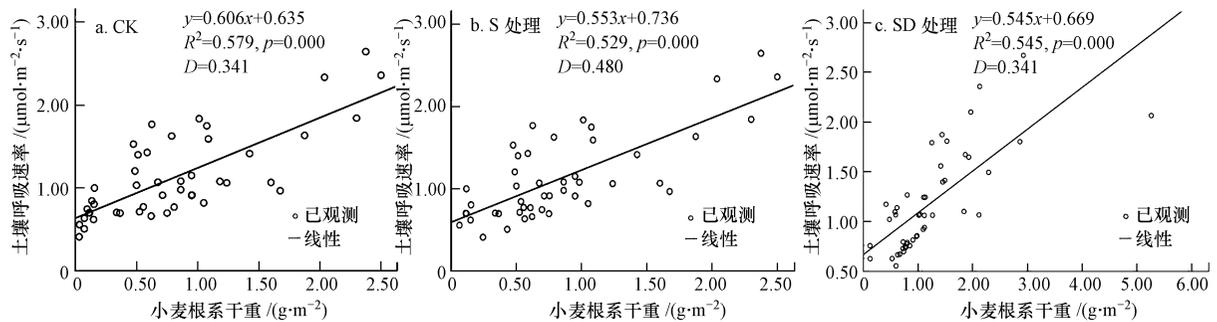


图3 不同土壤处理条件下根系生物量与土壤呼吸的回归分析

Fig.3 Regression analysis of root biomass and soil respiration under different treatments

表3 不同土壤处理条件下根系呼吸占土壤呼吸的比例

Table 3 Contribution of root respiration to soil respiration under different treatments

处理	土壤呼吸速率 $R_t/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	微生物呼吸速率 $R_m/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	根系呼吸速率 $R_r$ $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	根系呼吸 作用比例
CK	$1.12\pm 0.076$	0.64	0.48	42.9%
S	$1.21\pm 0.100$	0.74	0.53	43.8%
SD	$1.19\pm 0.073$	0.67	0.52	43.7%

相关分析(表4)表明,在各个处理水平,土壤呼吸速率与小麦根系生物量均显著相关( $p<0.01$ );在CK和SD处理条件下,土壤水分与土壤呼吸之间显著相关( $p<0.05$ ,  $p<0.01$ );秸秆覆盖条件下土壤温度与土壤呼吸呈显著相关( $p<0.01$ ),而对照组中两者之间的相关性不显著;土壤有机碳含量只有在S处理中与土壤呼吸显著相关( $p<0.01$ ).综合来看,土壤呼吸与根系生物量显著相关,而与土壤温度、土

表4 不同处理土壤呼吸速率与影响因素之间的相关关系

Table 4 Correlation coefficients between soil respiration rate and influencing factors

处理	$r$			
	10 cm 土壤水分	10 cm 土壤温度	根系 生物量	土壤有机 碳含量
CK	-0.446 *	0.303	0.577 **	0.221
S	-0.126	0.550 **	0.635 **	0.809 **
SD	-0.602 **	0.573 **	0.549 **	-0.110

壤有机碳含量和土壤水分之间部分处理表现出相关性.在小麦生长季内,土壤温度低于微生物与植物生长的适宜范围,因此,土壤呼吸速率随温度的升高而增强;而这一时期的土壤水分相对较高,对土壤呼吸产生了抑制作用.

## 4 讨论(Discussion)

### 4.1 土壤呼吸动态变化及影响因素

在小麦生长季内土壤呼吸速率先增加后降低,呈单峰型变化趋势;经过秸秆覆盖处理,土壤呼吸作用明显增强,其主要影响微生物活动,进而影响土壤呼吸速率(高云超等,2001;王芸等,2006).土壤呼吸作用的影响因素众多,水热因子、作物生物学特性和农业管理活动是造成中国农田生态系统土壤呼吸作用时空变异的主要因素(韩广轩等,2008).各因素之间并不是孤立存在的,不仅同时对土壤呼

吸产生影响,而且它们之间也有相互影响(刘绍辉等,1997;张东秋等,2005).在小麦各生长阶段,土壤呼吸速率与根系生物量变化趋势一致,呈单峰型变化,在抽穗期达到最大.尽管在小麦生长季这一较短时间尺度上,土壤呼吸与土壤温湿度之间相关性不显著,仅在个别时期与土壤有机碳含量表现出显著相关.但长期秸秆覆盖处理条件下,土壤呼吸与土壤温度、土壤有机碳含量和土壤水分之间表现出不同程度的相关性,而与土壤水分负相关.相关研究表明,玉米秸秆还田于麦田后,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,与土壤水分在一定范围内呈正相关,而土壤达到一定湿度后呈负相关(王丙文等,2013);在玉米农田土壤呼吸研究中,单一生长季空间尺度上土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度、土壤有机质、全氮和碳氮比的相关关系不显著(韩广轩等,2007).

#### 4.2 根系呼吸对土壤呼吸的贡献

精确估算植物根系呼吸占土壤呼吸的比例对于研究碳动态循环过程具有重要意义,目前国内外对根系呼吸作用的研究大多集中在森林和草原生态系统,对农业生态系统中农作物根系呼吸作用占土壤呼吸作用比例的研究鲜有报道.然而农业生态系统是碳循环中的一个重要环节,据估计,农业源排放的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 分别占人为温室气体排放量的21%~25%和57%(林而达,2001).因此,对农业生态系统各组分占土壤呼吸比例的精确估算尤为重要.

本文采用根系生物量外推法对小麦根系呼吸作用比例进行估算,在小麦生长季内均值为46.3%,与Cheng等(1993)采用同位素标记法测定的结果(40.6%)相当,但远低于Swinnen(1994)采用 $\text{C}^{14}$ 标记法测得的结果(75%~90%).国内采用根系生物量外推法对草地群落根系呼吸进行估算,结果为40.3%(刘立新等,2006);玉米根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例均值为54.5%,其中,根系呼吸波动较大而微生物呼吸波动较小(韩广轩等,2007),此结论与本研究相同.在不同陆地生态系统中,根系呼吸占土壤呼吸作用的比例大部分在10%~90%之间(Hanson *et al.*,2000),这与测定方法、植被、气候等条件有关.结合已经公布的数据,非森林生态系统全年或生长季中根系呼吸作用占土壤呼吸作用比例的均值为60.4%(Hanson *et al.*,2000).本研究测得小麦生长季内根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比

例在28.2%~56.9%之间,处于合理范围内,而均值(46.3%)低于上述统计均值.

#### 4.3 秸秆覆盖对土壤呼吸各部分的影响

有研究表明,秸秆还田能够显著提高土壤微生物量碳和活跃微生物量,在小麦越冬期显著提高土壤呼吸作用(王芸等,2006);有关秸秆还田配合施用化肥能够明显减弱化肥对微生物的抑制作用(曹志平等,2006).秸秆还田对根系呼吸作用影响的报道较少,在本研究中,S和SD处理分别比CK的土壤呼吸速率增加了45.0%和29.4%,通过根系生物量外推法在不同处理条件下估算根系呼吸和微生物呼吸速率,S和SD处理相比CK处理根系呼吸和微生物呼吸作用均增强,但S处理根系呼吸比例低于CK,而SD处理与CK接近.推测由于秸秆覆盖改变土壤温湿度条件及营养元素组成,进而影响微生物活性和呼吸速率,而对根系呼吸作用影响不大.

### 5 结论(Conclusions)

在紫色土丘陵区“早三熟”耕作模式下的小麦生长季内,采用根系生物量外推法估算小麦根系呼吸速率,其呼吸速率在 $0.2 \sim 1.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间变化,占土壤呼吸作用的比例在28.2%~56.9%之间,与根系生物量变化趋势一致.土壤呼吸的影响因素众多,受时间和地域等条件限制.在小麦生长季这一较短时间尺度上,根系生物量变化对土壤呼吸产生主要影响,各因素对土壤呼吸的联合影响和相互作用需要在较大时间尺度上做进一步分析.秸秆覆盖可以显著增强土壤呼吸作用,但秸秆覆盖如何影响土壤呼吸,具体影响土壤呼吸的哪一部分有待进一步研究;不同处理间,土壤呼吸与各影响因素间的相关性存在差异.

**责任作者简介:**王龙昌(1964—),博士,教授,博士生导师,重庆市学术技术带头人.研究方向:农业资源与高效农作制度、生态农业与可持续发展.E-mail:wanglc2003@163.com.

#### 参考文献(References):

- Bayer J M, Ochsner T E, Venterea R T, *et al.* 2007. Tillage and soil carbon sequestration—what do we really know? [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 118(1/4): 1-5
- Blanco-Canqui H, Lal R. 2008. No tillage and soil profile carbon sequestration: an on farm assessment [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 72(3): 693-701
- Buchmann N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 32(11/

- 12): 1625-1635
- 曹志平, 胡诚, 叶钟年, 等. 2006. 不同土壤施肥措施对华北高产农田土壤微生物生物量碳的影响[J]. 生态学报, 26(5): 1486-1493
- 程慎玉, 张宪洲. 2003. 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, 18(4): 597-602
- Cheng W X, Coleman David C, Carroll C, *et al.* 1993. In situ measurement of root respiration and soluble C concentrations in the rhizosphere[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 25(9): 1189-1196
- Doran J W, Parkin T B. 2001. Defining soil quality for a sustainable environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 35: 3-22
- 高云超, 朱文珊, 陈文新. 2001. 秸秆覆盖免耕土壤细菌和真菌生物量与活性的研究[J]. 生态学杂志, 20(2): 30-36
- Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 48(1): 115-146
- 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 2007. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J]. 生态学报, 27(12): 5254-5261
- 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 2008. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 32(3): 719-733
- Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. 1991. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 351(6324): 304-306
- Larionova A A, Yermolayev A M, Blagodatsky S A, *et al.* 1998. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 27(3): 251-257
- 林而达. 2001. 气候变化与农业可持续发展[M]. 北京: 北京出版社
- 刘立新, 董云社, 齐玉春. 2006. 锡林河流域生长季节不同草地类型根系呼吸特征研究[J]. 环境科学, 27(12): 2376-2381
- 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 等. 2008. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志, 27(11): 2014-2027
- 刘绍辉, 方精云. 1997. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 17(5): 469-476
- 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊. 2001. 秸秆还田机理与技术模式[M]. 北京: 中国农业出版社
- Lundegårdh H. 1927. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth [J]. *Soil Science*, 23(6): 417-453
- Raich J W, Schlesinger W H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 44(2): 81-99
- Singh J S, Gupta S R. 1977. Plantdecomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 43(4): 449-528
- Swinnen J. 1994. Evaluation of the use of a model rhizodeposition technique to separate root and microbial respiration in soil[J]. *Plant and Soil*, 165(1): 89-101
- 唐罗忠. 2008. 土壤中根系呼吸通量的分离测定方法综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 32(2): 97-102
- 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 2013. 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, 24(5): 1374-1380
- 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 2006. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 22(2): 27-32
- 王芸, 韩宾, 史忠强, 等. 2006. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 20(4): 120-122, 142
- 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 2005. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 20(7): 778-785
- 张国盛, Chan K Y, Li G D, 等. 2008. 长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响[J]. 生态学报, 28(6): 2722-2728