

## 恩施典型烟田烤烟生长期土壤呼吸变化与碳平衡

戴衍晨<sup>1</sup>, 王 瑞<sup>2</sup>, 申国明<sup>1</sup>, 张继光<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 张继旭<sup>1</sup>, 刘 龙<sup>1</sup>, 薄国栋<sup>1</sup>, 高 林<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 农业部烟草生物学与加工重点实验室, 青岛 266101; 2. 湖北省烟草公司恩施州公司, 湖北恩施 445000)

**摘 要:** 采用静态箱—红外 CO<sub>2</sub> 分析法研究了烟田垄体土壤呼吸、土壤微生物呼吸和垄间土壤呼吸在烤烟生长期的变化特征以及垄体土壤呼吸组分的贡献率, 估算了烤烟生长期烟田生态系统碳平衡。结果表明, 受烤烟生长和土壤温度的影响, 垄体土壤呼吸速率具有明显的生长期变化特征, 还苗期与伸根期土壤呼吸速率增长较慢, 后期土壤呼吸速率逐步增大, 在移栽后第 107 天达到最大值 C 256.8 mg/(m<sup>2</sup>·h)。土壤微生物与垄间土壤呼吸速率在烤烟生长期变化较小。垄体土壤呼吸及其组分和垄间土壤呼吸在 10 cm 土层温度的 Q<sub>10</sub> 值大小顺序为: 根系呼吸>垄体土壤呼吸>土壤微生物呼吸>垄间土壤呼吸。整个烤烟生长期根系呼吸与土壤微生物呼吸占垄体土壤呼吸的均值分别为 44.2%、55.8%, 净初级生产力碳固定量 C 2975.9 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤异养呼吸碳释放量 C 1409.1 kg/hm<sup>2</sup>, 烟田生态系统净碳输入 C 1566.8 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 烟田; 静态箱法; 土壤呼吸; 根系呼吸; 碳平衡

中图分类号: S572.06

文章编号: 1007-5119 (2015) 04-0063-07

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2015.04.011

## Variations of Soil Respiration during Flue-cured Tobacco Growth Period and Carbon Balance in Tobacco Fields

DAI Yanchen<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, SHEN Guoming<sup>1</sup>, ZHANG Jiguang<sup>1</sup>, LI Zhigang<sup>1</sup>, ZHANG Jixu<sup>1</sup>,  
LIU Long<sup>1</sup>, BO Guodong<sup>1</sup>, GAO Lin<sup>1\*</sup>

(1. Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture, Qingdao 266101, China; 2. Enshi Branch of Hubei Tobacco Company, Enshi, Hubei 445000, China)

**Abstract:** In order to investigate the variations of soil respiration rate during flue-cured tobacco growth period and carbon balance of tobacco field ecosystems, a closed chamber technique (infrared CO<sub>2</sub> analyser) was used to determine variations of respiration rate of the ridge soil, the ridge soil without roots (soil microbial) and the soil between ridges. The contribution of root respiration to the ridge soil respiration was analyzed and the carbon balance of tobacco field ecosystems was estimated. The results showed that during the flue-cured tobacco growth period, the ridge soil respiration was affected by flue-cured tobacco growth and soil temperature, displaying a significant seasonal variation. During the early growth period, the soil respiration rate increased slowly, and then it increased gradually, with a peak occurring on the 107th day C 256.8 mg/(m<sup>2</sup>·h) after tobacco seedling transplanting. Seasonal variation of respiration rate of the ridge soil without roots and the soil between ridges was not significant. The order of Q<sub>10</sub> value of soil temperature at 10 cm depth with the ridge soil respiration with its components and respiration of the soil between ridges was root respiration>the ridge soil respiration>soil microbial respiration> the soil between ridges respiration. During the whole growth period, the contribution of root respiration to the ridge soil respiration was 44.2%, while the soil microbial respiration was 55.8%. In the flue-cured tobacco fields, the net primary productivity carbon was C 2975.9 kg/hm<sup>2</sup>, and soil heterotrophic respiration to release carbon was C 1409.1 kg/hm<sup>2</sup> and the net ecosystem carbon budget was C 1566.8 kg/hm<sup>2</sup>.

**Keywords:** tobacco field; closed chamber technique; soil respiration; root respiration; carbon balance

陆地土壤是全球碳库中最大的碳库, 为植被碳库的 2~3 倍, 大气碳库的 2 倍<sup>[1]</sup>。土壤呼吸是土壤碳库向大气输入碳的主要途径<sup>[2]</sup>, 土壤呼吸

速率的微小变化将会显著地影响大气 CO<sub>2</sub> 浓度和土壤有机碳的累积速率, 从而加剧或减缓全球气候变化<sup>[3-4]</sup>。土壤呼吸包括三个生物学过程和一个

基金项目: 中国烟草总公司科技重点项目“‘清江源’生态富硒特色烟叶生产关键技术研究与应用”(110201202014);

国家自然科学基金(41201291)

作者简介: 戴衍晨(1990-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为土壤生态。E-mail: dyc514232@163.com。\*通信作者, E-mail: glg2000@126.com

收稿日期: 2015-01-23

修回日期: 2015-04-04

化学氧化过程,即植物根系呼吸、土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸和含碳矿物质氧化分解过程<sup>[5]</sup>。土壤呼吸组分的研究有助于明确某个特定的生态系统碳平衡和区分不同土壤呼吸组分对环境变化的敏感性<sup>[6]</sup>,同时对深入理解土壤呼吸的生态过程和微观机制具有重要意义<sup>[7]</sup>。目前采用较多的方法有根排除法、挖沟分离法、同位素法和根系生物量外推法<sup>[5]</sup>。农田生态系统作为陆地生态系统重要组成成分,受人为因素干扰尤为强烈,是CO<sub>2</sub>排放的重要源和汇<sup>[8]</sup>。在研究农田生态系统碳平衡时,作物根系呼吸不是土壤有机碳的损失,需将其从土壤呼吸中扣除<sup>[9]</sup>。施肥、耕作、作物类型等均是影响土壤CO<sub>2</sub>排放的重要因素<sup>[10]</sup>,因此不同农田生态系统土壤呼吸和碳平衡有所差异。

烤烟是我国重要的一种经济作物,其常用的种植模式为垄作。相比垄间土壤,垄体土层厚,土壤孔隙度大,利于作物生长<sup>[11]</sup>,且垄体土壤施肥,必然会对垄体与垄间的土壤呼吸造成差异,目前关于烟田土壤呼吸在烤烟生长期的变化和碳平衡研究还鲜有报道。因此,研究垄作模式下烟田土壤呼吸的空间异质性及碳平衡特征对于进一步评价农田生态系统碳源/汇具有重要意义。本研究以恩施典型烤烟烟田生态系统为对象,通过测定分析垄体土壤呼吸及其组分和垄间土壤呼吸速率在烤烟生长期的变化,并估算烟田生态系统碳平衡,以期对烟田生态系统碳循环和碳平衡的深入研究提供科学数据和方法指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地位于湖北省恩施市“清江源”现代烟草农业科技园区望城坡村(30°19'22"N, 109°25'12"E),海拔1203.0 m,属于亚热带季风和季风性湿润气候,多年平均气温13.3℃,降雨量1435.0 mm。区域土壤为黄棕壤,pH 6.9,容重1.1 g/cm<sup>3</sup>,有机质11.1 g/kg,碱解氮85.6 mg/kg,速效钾118.7 mg/kg,速效磷22.7 mg/kg。

### 1.2 试验设计

2014年4月选择土壤类型、坡度及坡向一致的烟田作为试验样地。供试品种为云烟87,株距×行距为0.55 m×1.2 m,垄高为0.25 m,垄宽为0.6 m,烤烟种植密度为15 000株/hm<sup>2</sup>。施肥方式为当地的常规施肥,纯氮用量为120 kg/hm<sup>2</sup>, $m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)=1:1.5:3$ ,70%的氮肥和钾肥及100%磷肥施于底肥,30%氮肥和钾肥用于移栽后30 d左右结合培土进行追肥。其他田间管理措施均按照当地优质烟叶生产技术标准进行。

为区分垄体土壤呼吸中的根系自养呼吸与土壤微生物异养呼吸,采用根排除法<sup>[8]</sup>。根排除法计算原理:带根土壤呼吸减去无根土壤呼吸可看作是作物根系呼吸<sup>[12-13]</sup>。操作方法为:在样地中选取3行垄体土壤,进行相同的施肥与灌溉而不移栽烟苗,此处无根土壤呼吸即为垄体土壤微生物呼吸(简称土壤微生物呼吸,下同)。烟苗于4月30日采取“井窖式”小苗移栽,移栽后每隔7 d测定1次垄体土壤呼吸、土壤微生物呼吸及垄间土壤呼吸,直到烟叶成熟并采收结束,若出现连续下雨天测定时间可适当推迟或提前。

### 1.3 土壤呼吸的测定

土壤呼吸的测定采用静态箱—红外CO<sub>2</sub>分析法,测定仪器为便携式红外CO<sub>2</sub>分析仪(型号为ST-303,广州市盈翔嘉仪器仪表有限公司)。静态箱分为垄体土壤气体观测箱与垄间土壤气体观测箱两种:前者静态箱的规格为55 cm×60 cm×55 cm,60 cm箱体面底部为马鞍形,可跨埋在垄体上,后者静态箱的规格为55 cm×60 cm×30 cm。静态箱均为自制,采用不透明塑料板制成,箱体顶部有一个直径15 cm的风扇(12 V电池供电)及分析仪和温度计插口(硅胶密封),并通过水压测试。

测定的前1天选出具有田间代表性的3棵烟株(垄体土壤),与3处垄体无根土壤、垄间土壤,在尽量不扰动土壤的前提下,去除各待测区域土壤表面杂草,经过24 h平衡后开始垄体土壤呼吸、

土壤微生物呼吸及茏间土壤呼吸的测定。测定时间为 9:00—11:00，步骤如下：测定茏体土壤呼吸时，先沿茏体土壤表面剪断烟株茎基部，再将静态箱并插入前一天挖好的以烟株为中心，长宽为 55 cm×60 cm，深度为 10 cm 的方形凹槽土壤内，然后用土填满箱体与土壤的接触缝隙并压实，起到密封的效果。测定前开动箱顶风扇，使箱内气体混匀，再连接红外 CO<sub>2</sub> 分析仪，在 0~7 min 内间隔 1 min 测定 1 次箱内 CO<sub>2</sub> 浓度，重复测定 3 次，同时使用 JM624 数字温度计（天津今明有限公司）测量箱体内及 10 cm 土层温度。土壤微生物呼吸和茏间土壤呼吸的测定与上述操作相同。

#### 1.4 土壤 CO<sub>2</sub> 通量的计算

$$F = \rho \times H \times 273 / (273 + T) \times P / P_0 \times dC_t / dt^{[8,14]} \quad (1)$$

式中  $F$  为 CO<sub>2</sub> 通量，单位为 C mg/(m<sup>2</sup>·h)； $\rho$  为标准状态下 CO<sub>2</sub> 密度，即 1.963 g/L； $H$  为箱体有效高度 (m)； $P_0$  为标准状态下的大气压 (1.01×10<sup>5</sup> Pa)； $P$  和  $T$  为测定时箱内的实际气压和气温； $dC_t/dt$  为单位时间 (h) 箱内气体浓度 (μL/L) 的变化量。

生长期土壤 CO<sub>2</sub> 累积排放量计算公式：

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24^{[8,14]} \quad (2)$$

式中  $M$  为 CO<sub>2</sub> 累积排放量，单位为 C kg/hm<sup>2</sup>； $F$  为 CO<sub>2</sub> 排放通量，单位 C mg/(m<sup>2</sup>·h)； $i$  为测定次数； $t$  为采样时间即移栽后天数，单位 d。

#### 1.5 烤烟生物量及各组分含碳量的测定

烤烟地上与地下生物量的测定和土壤呼吸的测定同时进行。地上生物量即为剪断后的烟株，并分离烟叶与茎，地下生物量采用挖掘法，挖取静态箱内土体中的完整烟株根系。地上及地下鲜样带回实验室洗净后，于 105 °C 烘箱内杀青 30 min，再在 70 °C 下烘干至恒重。烟株的根、茎和叶的含碳率测定，采用重铬酸钾—硫酸氧化容量法<sup>[15]</sup>。

#### 1.6 烟田生态系统碳平衡估算

采用净生态系统生产力 NEP (Net Ecosystem Productivity) 来表示生态系统的碳平衡，计算公式为：NEP=NPP-Rm<sup>[14,16-17]</sup> (3)

式中净初级生产力 NPP (Net Primary Productivity) 为收获期作物地上与地下生物量含碳量之和， $R_m$  为作物生长期土壤微生物异养呼吸碳释放量。当 NEP 为正值时，表示生态系统净吸收大气中 CO<sub>2</sub>，属于碳汇；反之，生态系统属于碳源。

#### 1.7 数据处理

数据为 3 次重复的平均数，数据整理与分析采用 Excel 2010 和 SAS 9.2。

土壤呼吸与土壤温度间关系，采用指数模型进行回归分析，公式<sup>[18-19]</sup>为：

$$y = ae^{bT} \quad (4)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (5)$$

式中  $y$  为土壤呼吸速率 [C mg/(m<sup>2</sup>·h)]， $T$  为温度 (°C)， $b$  为温度反应系数， $Q_{10}$  为土壤呼吸对温度的敏感性指标。

## 2 结果

### 2.1 烤烟生长期生物量的变化

由图 1 可知，烤烟生长前期，地上与地下生物量增长缓慢，地下生物量自移栽后第 53 天迅速增长，直到烟叶采收结束生物量达到最大值 321.7 g/m<sup>2</sup>。地上生物量的变化规律与地下生物量不同，其变化呈单峰型，前期增长缓慢，移栽后 53~81 d 迅速增长，之后又逐渐下降。其原因是前期烤烟生长缓慢，移栽后 53~81 d 正处于烤烟旺长期与圆顶期，光合作用旺盛，地上生物积累迅速，之后随着烟叶的成熟采收，地上生物量呈减小趋势。总生物量的变化规律与地上生物量基本一致。

### 2.2 烤烟生长期茏体土壤、土壤微生物和茏间土壤呼吸的变化

由图 2 可知，烤烟生长期，茏体土壤呼吸速

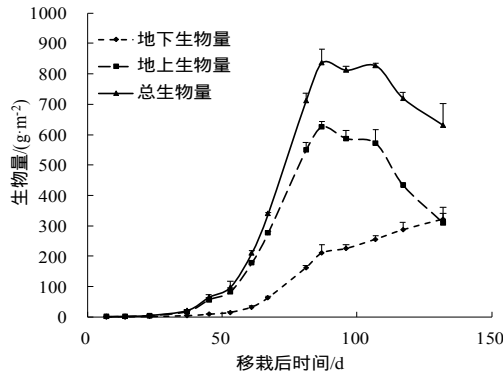


图1 地下生物量、地上生物量和总生物量的变化

Fig. 1 Variations of shoot biomass, root biomass and total biomass of flue-cured tobacco during the growth period

率具有明显的变化特征,随着烤烟生长时间的延长和环境因子的变化,土壤呼吸速率出现波动。移栽后 7~37 d,土壤呼吸速率较低,这是由于这段时间处于烤烟还苗期与伸根期,土壤呼吸主要源于土壤微生物呼吸,且土壤温度相对较低,抑制了土壤微生物活性。随着烤烟的生长与土壤温度的升高,土壤呼吸速率逐渐上升,到移栽后第 81 天,土壤呼吸速率出现第 1 次峰值  $C\ 230.1\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。原因是该测定时期较强的地上同化能力促进了根系呼吸速率达到峰值 [ $C\ 140.1\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ]。移栽后 87~96 d,土壤呼吸速率出现了一个低谷值,其可能有为 2 次测定日期前一天,田间均发生了烟叶采收,叶面积系数的迅速降低,使得输送到地下的光合产物迅速减少,同时土壤温度也略有降低,共同导致了土壤呼吸速率的降低。其后,土壤呼吸速率在移栽后第 107 天出现第 2 次峰值 [ $C\ 256.8\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ] ,主要原因为该测定时期土壤温度为全生育期中最高,驱动了土壤微生物呼吸速率达到峰值 [ $C\ 128.9\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ] ,加上根系生物量不断积累,较大根系呼吸速率 [ $C\ 127.8\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ] 的共同作用。烟叶采收末期,随着地上生物量的减小和土壤温度的降低,土壤呼吸速率呈下降趋势,直到采收结束。

土壤微生物呼吸速率也具有一定的生长期变化 [ $C\ 36.1\sim 128.9\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ] ,但变化趋势没有茎体土壤呼吸速率那么明显,与 10 cm 土层温度变化趋势基本一致。垄间土壤呼吸速率变化幅度最小

[ $C\ 7.0\sim 13.7\ \text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ] ,与土壤微生物呼吸相比,其呼吸速率较低。这主要是由于垄作增大了茎体土壤与空气的接触表面积,有利于加强增温效应,提高 20~40 cm 土层的呼吸强度<sup>[20]</sup>。另外,茎体土壤施用了肥料,研究表明施肥与外源有机物的添加可以显著提高土壤微生物对碳源的利用率,加强土壤有机碳矿化分解的能力<sup>[8,19]</sup> ,从而提高土壤微生物呼吸速率。

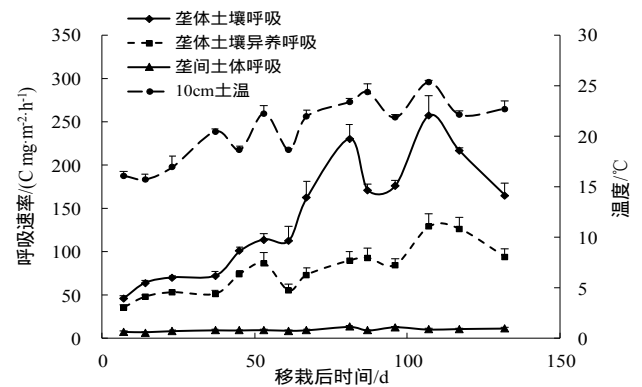


图2 垄体土壤、土壤微生物及垄间土壤呼吸速率的变化

Fig. 2 Variations of respiration rate of the ridge soil, the ridge soil without roots and the soil between ridges during the growth period

### 2.3 茎体土壤呼吸及其组分、垄间土壤呼吸与土壤温度的关系

由表 1 可知,茎体土壤呼吸、根系呼吸、土壤微生物呼吸和垄间土壤呼吸与 10 cm 土层温度均呈显著的指数正相关 ( $p<0.01$ ) ,拟合的决定系数  $R^2$  分别达到了 0.780、0.696、0.749 和 0.722 ,说明 10 cm 土层温度是影响烤烟生长期土壤呼吸变化的重要因素之一。 $Q_{10}$  值大小表现为:根系呼吸>茎体土壤呼吸>土壤微生物呼吸>垄间土壤呼吸,说明根系呼吸温度敏感性最高,垄间土壤呼吸温度敏感性最低。

### 2.4 各生育期茎体土壤呼吸速率及其组分的贡献率

由表 2 可知,随着烤烟生育期的进程,茎体土壤呼吸速率 ( $R_s$ )、土壤微生物呼吸速率 ( $R_h$ ) 及根系呼吸速率 ( $R_a$ ) 均值都呈增大的趋势,而

表1 烤烟生长期垄体土壤呼吸及其组分、垄间土壤呼吸与10 cm土层温度的拟合关系

Table 1 Relationship between soil temperature at 10 cm depth and respiration of the ridge soil with its components and the soil between ridges during the flue-tobacco growth period

项目	拟合方程	R <sup>2</sup>	P	Q <sub>10</sub>
垄体土壤呼吸	$y=9.604e^{0.125T}$	0.780	<0.01	3.5
根系呼吸	$y=2.548e^{0.154T}$	0.696	<0.01	4.6
土壤微生物呼吸	$y=10.841e^{0.093T}$	0.749	<0.01	2.5
垄间土壤呼吸	$y=3.019e^{0.057T}$	0.722	<0.01	1.8

表2 各生育期垄体土壤呼吸速率均值及Ra、Rh分配比例

Table 2 The average respiration rate of ridge soil during the growth period and the ratio of Ra and Rh

生育期	Rs/(C mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Rh/(C mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Ra/(C mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Rh/Rs	Ra/Rs
还苗期	50.9	39.2	11.8	76.9	23.1
伸根期	74.2	54.7	19.5	73.8	26.2
旺长期	117.7	72.6	45.1	61.7	38.3
成熟期	252.1	126.9	125.3	50.3	49.7
全生育期	141.8	79.1	62.7	55.8	44.2

注：还苗期、伸根期、旺长期、成熟期分别为移栽后0~14 d、15~45 d、46~67 d、68~132 d。

Rh/Rs 逐渐减小，Ra/Rs 逐渐增大。在还苗期与伸根期，受烤烟生长缓慢的影响，Ra 值较小，为 C 11.8~19.5 mg/(m<sup>2</sup>·h)，Rh 占 Rs 主导部分，Rh/Rs 达到 73.8%~76.9%。进入旺长期与成熟期，Ra/Rs 有所增大，为 38.3%~49.7%，原因是根系呼吸的底物源于地上转移至根系的同化产物<sup>[7,21]</sup>，旺长期与成熟期光合产物向地下输送量的增加，根系生长较快（图1）。整个烤烟生长期，Rh 与 Ra 占 Rs 的均值分别为 55.8%、44.2%。

## 2.5 烤烟生长期烟田生态系统碳平衡估算

垄作栽培模式下烟田土壤异养呼吸累计碳释放量（Rm）包括土壤微生物呼吸（Mh）和垄间土壤呼吸（Ms）两部分（表3），计算值由公式（2）可得。烟叶采收结束时，根、茎和叶干物质量分别为 1592.2、1528.7 和 3046.5 kg/hm<sup>2</sup>，含碳率测得值分别为 476.4、494.7 和 479.6 g/kg，根据烤烟种植密度计算 NPP 为 C 2975.9 kg/hm<sup>2</sup>。由公式（3）可得烟田净生态系统生产力 NEP 为 C 1566.8 kg/hm<sup>2</sup>（表3），可知烟田生态系统在烤烟生长期属于碳汇。

表3 烤烟烟田生态系统碳平衡 C kg/hm<sup>2</sup>Table 3 Carbon balance of flue-cured tobacco ecosystems C kg/hm<sup>2</sup>

因子	Mh	Ms	Rm=Mh+Ms	NPP	NEP=NPP-Rm
数值	1252.5	156.6	1409.1	2975.9	1566.8

注：垄体土壤与垄间土壤在烟田中各按 50% 面积计算。

## 3 讨论

### 3.1 烟田土壤呼吸对土壤温度的响应及其组分贡献率

土壤温度是影响土壤呼吸重要的主要影响因素之一<sup>[22]</sup>，目前研究者普遍使用 Q<sub>10</sub> 来表示土壤呼吸与温度之间的关系<sup>[23]</sup>。本研究烟田垄体土壤呼吸、根系呼吸、土壤微生物呼吸和垄间土壤呼吸与 10 cm 土层温度呈显著的正相关，Q<sub>10</sub> 值分别为 3.5、4.6、2.5、1.8。Boone 等<sup>[24]</sup>研究的根呼吸

的 Q<sub>10</sub> 值是 4.6，而土壤微生物呼吸的 Q<sub>10</sub> 值仅为 2.5，他认为根呼吸如此大的 Q<sub>10</sub> 值是根生物量的季节性变化和现存根量对温度变化共同响应的结果。张风霞等<sup>[11]</sup>研究玉米农田中垄体土壤呼吸及其组分 Q<sub>10</sub> 值大小顺序为：根系呼吸（4.4）>土壤总呼吸（3.1）>土壤异养呼吸（2.1），与本研究烟田垄体土壤呼吸及其组分 Q<sub>10</sub> 值及大小顺序一致。垄间土壤呼吸 Q<sub>10</sub> 值最小，其原因是底物质量和底物供应会显著影响土壤呼吸及其温度敏感性<sup>[25]</sup>，

茎间土壤呼吸底物质量有效性较低,对土壤微生物呼吸的限制作用影响了土壤异养呼吸  $Q_{10}$  值。当土壤底物的有效性增强时,土壤呼吸对温度的敏感性会升高<sup>[19]</sup>。

陈敏鹏等<sup>[6]</sup>综述了不同生态系统土壤呼吸组分分离技术,指出农田生态系统根呼吸对土壤呼吸的平均贡献率一般不到 50%。根排除法是一种间接测定根系呼吸对土壤呼吸贡献的方法,因其简单、便于操作和破坏性小在不同生态系统中被广泛采用<sup>[26]</sup>。张赛等<sup>[17]</sup>采用根排除法测定麦田中根系呼吸占土壤呼吸的 47.1%,蔡艳等<sup>[13]</sup>亦采用根排除法测得玉米根系呼吸对土壤呼吸的贡献在生长期均值为 46%,本研究采用相同方法测得烤烟生长期根系呼吸占茎体土壤呼吸的 44.2%,与前人研究结果接近。

### 3.2 烟田生态系统碳平衡

在不同农田生态系统碳平衡研究中,由于作物种类、种植密度、耕作方式、灌溉方式等管理模式的不同,农田生态系统在作物生长期表现的碳汇强度有所差异<sup>[11]</sup>。Li 等<sup>[27]</sup>研究黄土高原谷子农田生态系统净碳输入为  $C\ 1408\ kg/hm^2$ ,梁尧等<sup>[14]</sup>研究小麦农田生态系统净碳输入为  $C\ 1643\ kg/hm^2$ ,本试验烟田生态系统净碳输入为  $C\ 1566.8\ kg/hm^2$ ,说明烤烟与谷子、小麦农田生态系统碳汇能力接近。而在玉米农田中往往表现较高的碳汇。李银坤等<sup>[28]</sup>研究不同氮水平下夏玉米生长季 NEP 为  $C\ 4898.2\sim 6766.8\ kg/hm^2$ 。Hollinger 等<sup>[29]</sup>利用涡度相关技术测定玉米农田生态系统在 3 年生长期中均为碳汇,NEP 变化幅度为  $C\ 7024\sim 8804\ kg/hm^2$ 。本研究中烤烟种植密度较低,仅为  $15\ 000\ 株/hm^2$ ,NPP 为  $C\ 2975.9\ kg/hm^2$ ,使得 NEP 估算值较低。韩广轩等<sup>[30]</sup>研究发现玉米地中,不同位置土壤呼吸速率表现为靠近植株>株间>行间,为精确估算生态碳平衡,需考虑土壤呼吸的空间异质性。本试验结果的茎体土壤微生物呼吸和茎间土壤呼吸存在差异较大,因此在估算烟田生态系统碳平衡时分别对其测定是非常必要的。

## 4 结 论

茎体土壤呼吸速率具有明显的生长期变化特征,最大值出现在移栽后第 107 天,为  $C\ 256.8\ mg/(m^2\cdot h)$ ,土壤微生物呼吸率和茎间土壤呼吸速率在烤烟生长期变化较小。

茎体土壤呼吸及其组分和茎间土壤呼吸与 10 cm 土层温度呈显著的正相关,温度敏感性  $Q_{10}$  值大小顺序为:根系呼吸>茎体土壤呼吸>土壤微生物呼吸>茎间土壤呼吸。

整个烤烟生长期,根系呼吸和土壤微生物呼吸占茎体土壤呼吸的均值分别为 44.2%、55.8%。烟田生态系统碳平衡为  $C\ 1566.8\ kg/hm^2$ ,表现为可从大气中净吸收  $CO_2-C\ 1566.8\ kg/hm^2$ 。

### 参考文献

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1): 1-22.
- [2] Peng Y Y, Thomas S C, Tian D L. Forest management and soil respiration: implications for carbon sequestration[J]. *Environmental Reviews*, 2008, 16(1): 93-111.
- [3] Don A, Schumacher J, Freibauer, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks -a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(4): 1658-1670.
- [4] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [5] 王兵,姜艳,郭浩,等.土壤呼吸及其三个生物学过程研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(2): 483-490.
- [6] 陈敏鹏,夏旭,李银坤,等.土壤呼吸组分分离技术研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7067-7077.
- [7] 吴会军,蔡典雄.土壤呼吸组分测定技术与农田管理措施影响的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (6): 10-15.
- [8] 乔云发,苗淑杰,王树起,等.不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1028-1035.
- [9] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(14): 1915-1925.
- [10] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.农田土壤主要温室气体( $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ )的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 966-975.

- [11] 张风霞, 韩娟娟, 陈银萍, 等. 科尔沁沙地玉米 (Zeamays) 田垄上和垄间土壤呼吸比较[J]. 中国沙漠, 2014, 34 (2): 378-384.
- [12] Fu S, Cheng W. Rhizosphere priming effects on the decomposition of soil organic matter in C<sub>4</sub> and C<sub>3</sub> grassland soils[J]. Plant and Soil, 2002, 238(2): 289-294.
- [13] 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.
- [14] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (4): 395-401.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 107-108.
- [16] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (1): 156-160.
- [17] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2419-2425.
- [18] Zhang T, Li Y F, Chang S X, et al. Responses of seasonal and diurnal soil CO<sub>2</sub> effluxes to land-use change from paddy fields to Lei bamboo (*Phyllostachys praecox*) stands[J]. Atmospheric Environment, 2013, 77: 856-864.
- [19] 花可可, 王小国, 朱波. 施肥方式对紫色土土壤异养呼吸的影响[J]. 生态学报, 2014, 34 (13): 3602-3611.
- [20] 王同朝, 王燕, 卫丽, 等. 作物垄作栽培法研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39 (4): 377-382.
- [21] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42 (1): 9-15.
- [22] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (3): 363-371.
- [23] 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 等. 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, 34 (7): 2815-2820.
- [24] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998, 396(6711): 570-572.
- [25] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [26] 任志杰, 高兵, 黄涛, 等. 不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (9): 2367-2375.
- [27] Li X D, Fu H, Guo D, et al. Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italica* (L.) Beauv. Cropland on the Loess Plateau, Northern China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2): 337-346.
- [28] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22 (1): 18-24.
- [29] Hollinger S E, Bernacchi C J, Meyers T P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130 (1-2): 59-69.
- [30] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 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, 2007, 27 (12): 5254-5261.