



## 论文

## 中国农田土壤呼吸速率及驱动因子

江国福, 刘畅, 李金全, 程浩, 方长明\*

复旦大学生命科学学院, 生物多样性和生态工程教育部重点实验室, 上海 200433

\* 联系人, E-mail: cmfang@fudan.edu.cn

收稿日期: 2014-04-28; 接受日期: 2014-05-12

国家自然科学基金(批准号: 31070461)和全球变化研究国家重大科学研究计划(批准号: 2010CB950602)资助项目

doi: 10.1360/N052013-00055

**摘要** 土壤呼吸在全球碳收支中具有重要地位. 研究中国典型农业区土壤呼吸的时空格局及影响因素, 有助于构建区域尺度土壤呼吸定量评价模型, 能够为评估中国乃至全球农业生态系统碳/源汇特征提供依据. 本研究整合了 2000~2012 年中国农田生态系统土壤呼吸的主要研究成果, 分析了华南、西南、华北、西北和东北 5 个典型农业区土壤呼吸的季节变化和区域差异, 以及影响土壤呼吸的主要驱动因子. 结果表明, 5 个典型农业区的土壤呼吸均存在明显的季节变化特征; 中国农田生态系统年均土壤呼吸速率为  $(682.8 \pm 18.3) \text{ g C m}^{-2}$ . 5 个典型农业区年均土壤呼吸速率大小表现为华南区 > 西南区 > 华北区 > 东北区 > 西北区. 全国农业土壤的年呼吸通量为  $(0.90 \pm 0.02) \text{ Pg C}$ ; 水作和旱作两种土地利用类型间土壤呼吸速率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 旱作土壤呼吸速率约为水作的 1.3 倍; 不同作物类型间土壤呼吸速率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其排序为棉花 > 玉米 > 大豆 > 水稻 > 小麦; 农田土壤呼吸与年均气温、土壤温度、土壤含水量和净初级生产力等影响因素呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 而与年均降水量的相关性不显著.

**关键词**农田生态系统  
土壤呼吸  
影响因子  
时空变异性

土壤呼吸是全球碳循环的重要过程, 是陆地生态系统中碳以  $\text{CO}_2$  形式返回到大气的主要途径<sup>[1]</sup>. 全球每年因土壤呼吸作用向大气排放碳量为 75~120 Pg C ( $10^{15} \text{ g}$ )<sup>[2-4]</sup>, 仅次于每年全球陆地总初级生产力, 是陆地生态系统第二大碳通量<sup>[5]</sup>. 可见, 土壤呼吸在陆地生态系统碳收支中扮演着重要的角色, 其微小的变化都可能直接影响全球碳平衡<sup>[6]</sup>, 认识与评估土壤呼吸是准确估算全球碳收支的关键.

农田是陆地生态系统的重要组成部分. 作为历史悠久的农业大国, 我国农业用地面积占国土总面积的 14%, 约  $1.33 \times 10^6 \text{ km}^2$ <sup>[7]</sup>. 在自然因素和人为干

扰的双重作用下, 农田碳库成为全球碳库中最活跃的部分<sup>[8]</sup>. 农田生态系统碳循环过程中, 土壤呼吸的巨大时空变化影响着区域乃至全球碳循环<sup>[7]</sup>. 因此, 研究中国农田生态系统土壤呼吸的时空变异及其驱动因子, 以及准确估算中国农田生态系统土壤呼吸量, 不仅对于区域乃至全球碳循环过程的研究具有重要意义, 也可为政府决策和行业发展提供依据<sup>[9]</sup>.

中国农田土壤呼吸的研究工作始于 20 世纪 60 年代<sup>[10]</sup>, 到 20 世纪 80 年代对土壤呼吸的研究开始在中国逐步展开<sup>[11-13]</sup>, 此后这方面的研究日益深入. 在区域尺度上对中国农田土壤呼吸的估算研究则开

引用格式: 江国福, 刘畅, 李金全, 等. 中国农田土壤呼吸速率及驱动因子. 中国科学: 生命科学, 2014, 44: 725-735

Jiang G F, Liu C, Li J Q, et al. Soil respiration and driving factors of farmland ecosystems in China. SCIENTIA SINICA Vitae, 2014, 44: 725-735, doi: 10.1360/N052013-00055

始于 20 世纪 90 年代<sup>[14]</sup>, 21 世纪初开始用模型估算中国区域土壤呼吸的大尺度研究<sup>[9,15,16]</sup>, 但对土壤呼吸的变化规律及其与驱动因子间关系的研究仍然不够深入<sup>[17]</sup>. 充分了解不同驱动因子与土壤呼吸之间的关系及其影响机制, 将有助于机理模型的完善及其准确性的提高. 而充足的样本量、广泛的区域代表性和较大的时间尺度则有助于提高基于统计学方法的经验模型的准确性. 陈书涛等人<sup>[17]</sup>在对中国陆地生态系统土壤呼吸变化的研究中指出, 区域土壤呼吸量估算准确性的提高有赖于土壤呼吸、气候、植被和土壤因子的长期同步观测样本量的增加, 以及土壤属性数据库的丰富和完善. 因此, 要准确地评估中国农田生态系统土壤呼吸的作用, 应着重加强不同区域典型农田生态系统土壤呼吸作用的比较、空间异质性、影响因素模拟及减排对策等方面的研究<sup>[18]</sup>.

本研究以国内文献报道的农田生态系统土壤呼吸数据为基础, 分析了中国典型农业区土壤呼吸的时空分布特征以及影响因素, 并初步估算了中国农田生态系统土壤呼吸量, 以期为更准确地研究中国区域碳循环提供数据基础和理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

(1) 数据来源与筛选. 本研究通过中国知网数据库初步检索出 2000 余篇研究中国土壤呼吸的相关文献. 为避免在数据收集过程中出现偏漏, 设定了 3 条数据收集标准对文献进行筛选: (i) 所研究的生态系统类型必须为农田生态系统; (ii) 土壤呼吸速率必须为野外实验的实际观测值, 且以日平均值表示; (iii) 野外观测实验发生在 2000~2012 年.

(2) 数据库建立. 通过筛选, 共有 112 篇文献符合本研究要求, 在此基础上建立中国农田土壤呼吸数据库. 数据库包括月均土壤呼吸速率、土壤温度、土壤含水量、净初级生产力(net primary productivity, NPP)、作物类型、观测方法等 6 个参数. 同时, 在数据库中录入实验相关的背景数据, 如实验地点的经纬度、年均气温、年均降水量等. 所有参数的相关数据从文献中直接获取, 如果文献中只提供图形结果, 则通过软件 GetData 2.24 进行数据获取. 另外, 根据生态气候带及农田耕作制度的差异, 参考 Cao 等人<sup>[15]</sup>的方法将中国农业种植区分为 5 个典型的农业区, 即

东北区、华北区、西北区、西南区和华南区. 中国典型农业区的划分及 101 个野外观测点的分布见图 1.

### 1.2 研究方法

(1) 土壤呼吸速率的转换和整合. 由于不同文献中测量时间、地区、耕作处理、作物类型、测量方法等不尽相同, 为了使不同文献间的数据具有可比性, 本研究对所选参数的值进行了归一化处理. 具体转换和整合方法如下:

(i) 土壤呼吸速率单位的统一. 将文献中的土壤呼吸速率单位统一为  $\text{g C m}^{-2} \text{天}^{-1}$ , 其与不同单位间的转换关系为:  $1 \text{ g C m}^{-2} \text{天}^{-1} = 365 \text{ g C m}^{-2} \text{年}^{-1}$ ;  $1 \text{ g C m}^{-2} \text{天}^{-1} = 365 \times 10^6 \text{ g C km}^{-2} \text{年}^{-1}$ ;  $1 \text{ g C m}^{-2} \text{天}^{-1} = 1/1.0368 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $1 \text{ g C m}^{-2} \text{天}^{-1} = 44/12 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{天}^{-1}$ ;  $1 \text{ g C m}^{-2} \text{天}^{-1} = 24 \times 44/12 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{h}^{-1}$

(ii) 月均土壤呼吸值和年均土壤呼吸值的计算. 土壤呼吸速率月均值计算公式:

$$R_{sm} = \frac{\sum_0^n R_{sd}}{n}, \quad (1)$$

土壤呼吸速率年均值计算公式:

$$R_{sa} = \frac{\sum R_{sm}}{12} \times 365, \quad (2)$$

式中  $R_{sd}$  表示日均土壤呼吸速率,  $R_{sm}$  表示月均土壤呼吸速率,  $R_{sa}$  表示年均土壤呼吸速率,  $n$  表示文献中当月观测的次数. 月均土壤呼吸速率的单位用  $\text{g C m}^{-2} \text{天}^{-1}$  表示, 年均土壤呼吸速率的单位用  $\text{g C m}^{-2} \text{年}^{-1}$  表示.

(iii) 土壤含水量统一为体积含水量. 土壤体积含水量与土壤质量含水量之间的换算公式:

$$\theta_v = \theta_m \times \rho, \quad (3)$$

式中  $\theta_v$  表示土壤体积含水量,  $\theta_m$  表示土壤质量含水量,  $\rho$  表示土壤容重.

(iv) 文献中空白数据的填补. 因多数实验不是全年连续观测或仅在生长季观测土壤呼吸, 某些月份会缺少数据. 为了尽可能多地获取相关数据, 同时保证数据的可靠性, 对文献中的空白数据根据以下规则进行插补(该数据插补方法已通过斜率检验): 根据不同试验地点对应的农业区将数据进行按区归类; 根据实测数据计算出该农业区每个月的平均土壤呼吸值, 以及总的土壤呼吸值; 根据观测点中的实测数

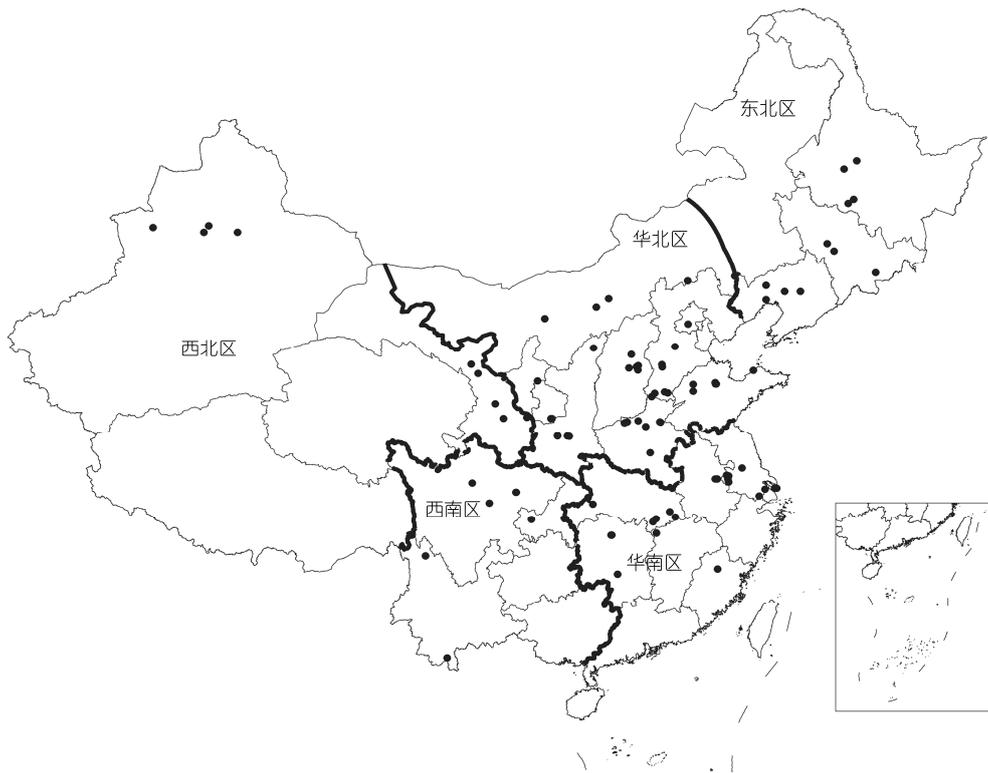


图1 中国典型农业区的划分及样点分布图

据计算出该观测点生长季(或非生长季)土壤呼吸值,以及相应月份全区平均生长季(或非生长季)土壤呼吸值;以全区平均生长季(或非生长季)土壤呼吸值占总呼吸值的比例为参照,计算出该观测点总呼吸值;以全区月均土壤呼吸值占总呼吸值的比例为参照,计算出该观测点缺失月份的土壤呼吸值。

#### (2) 数据分析.

(i) 不同土地利用类型土壤呼吸差异分析. 将土地利用类型分为旱作和水作两种类型,其中旱作以小麦(*Triticum aestivum*)-玉米(*Zea mays*)轮作、棉花(*Gossypium*)、大豆(*Glycine max*)为主,水作以水稻(*Oriza sativa*)、小麦-水稻轮作为主. 土壤呼吸速率值为不同土地利用类型下的年均土壤呼吸值.

(ii) 不同作物类型土壤呼吸速率差异分析. 选取中国典型农业区主要常规作物大豆、棉花、水稻、小麦和玉米进行土壤呼吸速率差异比较,其土壤呼吸速率值为作物生长季的平均土壤呼吸值. 不同作物生长季的选定:大豆和棉花为6~10月,水稻和玉米为5~9月,小麦为11月~次年5月.

(iii) 土壤呼吸与年均气温和年均降水量之间关

系. 以观测点为单位对数据进行分组,分别计算出每个观测点的年均土壤呼吸值,并与该观测点的年均气温和年均降水量数据配对,进行相关性分析.

(iv) 土壤呼吸速率与土壤温度和含水量之间关系. 由于小麦种植范围广、生长季长、土壤温度和含水量变化范围大,故本研究选取小麦作为单一作物类型对土壤呼吸速率与土壤温度和含水量之间的关系进行分析. 土壤温度和含水量数据均来自文献中与土壤呼吸同时观测的土壤0~10 cm处的温度和含水量.

(v) 中国农业区年均土壤呼吸量的计算. 根据各个农业区的农田面积和该区农田的年均土壤呼吸速率,计算中国农田土壤呼吸的加权均值. 农田面积的计算参考李长生等人<sup>[7]</sup>的数据.

(vi) 本研究采用单因子方差分析(One-way ANOVA)检测5个典型农业区土壤呼吸间的差异、以及不同耕作方式和不同作物类型间土壤呼吸的差异. 在比较过程中,当显著性水平 $P < 0.05$ 时,认为差异显著. 研究样地所处地理位置分布图采用 Arc GIS 9.3完成,所有统计分析采用 SPSS 19.0软件完成.

## 2 结果分析

### 2.1 中国典型农业区土壤呼吸特征

中国典型农业区土壤呼吸的季节变化特征如图 2 所示, 整个农业区土壤呼吸速率 1~12 月都呈现出先增加后下降的季节变化趋势. 冬季土壤呼吸速率低, 在夏季的 7, 8 月份土壤呼吸速率达到最大值. 华南区和西南区的土壤呼吸速率具有大致相同的季节变化趋势, 分别在 5, 6 月份表现为先小幅下降然后回升的现象. 从 10 月份到次年的 3 月份, 东北处于寒冷的冬季, 土壤呼吸维持在稳定的低值.

从空间分布上看, 中国农业生态系统年均土壤呼吸速率呈现出较为明显的区域差异(表 1). 5 个典型农业区年均土壤呼吸速率为 589.2~789.5 g C m<sup>-2</sup>, 大小排序为: 华南区>西南区>华北区>东北区>西北区.

华南区的土壤呼吸速率显著高于东北区、华北区和西北区( $P<0.05$ ), 而与西南区差异不显著. 西北区的年均土壤呼吸速率最低, 与最高的华南区相差约 200 g C m<sup>-2</sup>. 东北区的变异系数较高, 其值高达 80.3%, 约是西北区的 1.7 倍、西南区的 1.6 倍. 整个中国农业区土壤呼吸年总量约为(0.90±0.02) Pg C, 其中华北区的贡献最大, 约占全国的 32%, 西北区贡献最小, 约占全国的 7%.

### 2.2 不同土地利用类型土壤呼吸差异

不同土地利用类型土壤呼吸的分析结果显示, 旱作土壤呼吸速率平均为 705.5 g C m<sup>-2</sup> 年<sup>-1</sup>, 约为水作的 1.3 倍(表 2). 此外, 旱作土壤呼吸速率的变异程度也较水作高, 说明土地利用类型对土壤呼吸作用的影响显著, 且旱作条件下土壤呼吸速率高于水作.

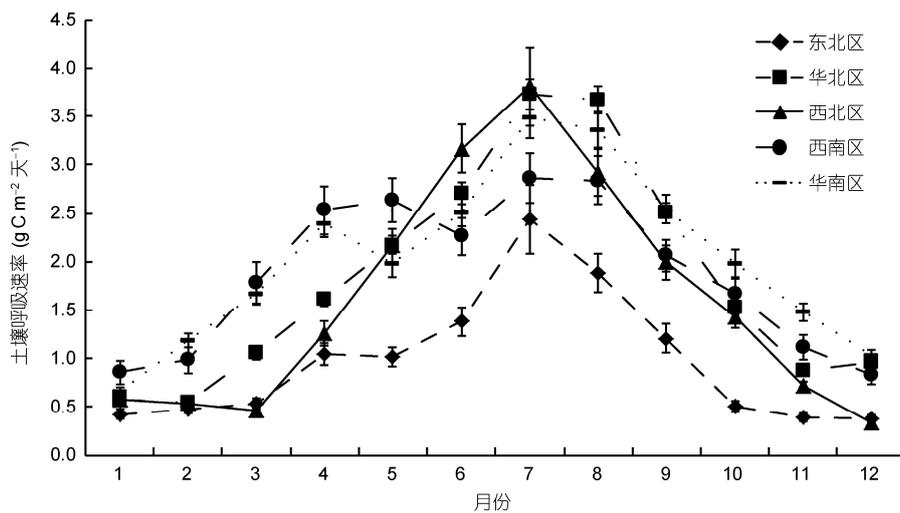


图 2 中国典型农业区土壤呼吸的季节变化特征

表 1 中国典型农业区土壤呼吸特征

农业区	农田面积(10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	土壤呼吸速率(g C m <sup>-2</sup> 年 <sup>-1</sup> )					土壤呼吸量 (Pg C 年 <sup>-1</sup> )
		最低	最高	$\bar{x} \pm SE$	变异系数(%)	n	
东北区	0.24	62.1	1726.5	598.2±63.6	80.3	57	0.14±0.02
华北区	0.44	102.2	2376.2	667.7±25.2	66.8	314	0.29±0.01
西北区	0.10	146.0	1120.6	589.2±44.0	46.0	38	0.06±0.01
西南区	0.24	124.1	1806.8	682.8±52.4	49.2	41	0.16±0.01
华南区	0.31	109.5	2146.2	789.5±40.4	56.7	123	0.24±0.01
全国	1.33	62.1	2376.2	682.8±18.3	64.0	573	0.90±0.02

### 2.3 不同作物类型土壤呼吸差异

中国典型农业区主要常规生长季平均土壤呼吸速率最高的是棉花, 最低的是小麦, 各作物类型生长季土壤呼吸速率大小为: 棉花>玉米>大豆>水稻>小麦(表 3). 其中, 棉花和玉米的土壤呼吸速率相近, 约是小麦土壤呼吸速率的 2 倍. 但玉米的变异系数较大, 达 73.76%. 大豆、棉花和玉米之间差异不显著, 但都显著高于水稻和小麦( $P<0.05$ , 表 3). 大豆、棉花和玉米的生长季相近, 土壤呼吸的差异可能更多地反映作物种类对土壤呼吸的影响. 水稻和小麦生长季较低的土壤呼吸则更多的是水稻生长季淹水和冬春季较低温度的结果.

### 2.4 土壤呼吸与年均气温、年均降水量之间的关系

土壤呼吸与年均气温和年均降水量的相关性分析表明, 农田土壤呼吸与年均气温呈显著线性正相关( $R^2=0.0477, P<0.05$ ; 图 3), 而与年均降水量之间的相关性不显著( $R^2=0.0142, P=0.257$ ; 图 4).

### 2.5 土壤呼吸与土壤温度和含水量的关系

如图 5 所示, 实时土壤呼吸速率与土壤温度呈显著指数正相关( $P<0.01$ ), 决定系数( $R^2$ )为 0.3072. 类似地, 土壤呼吸速率与土壤含水量呈显著线性正相关( $R^2=0.0583, P<0.01$ ; 图 6). 该结果表明, 在不考虑其

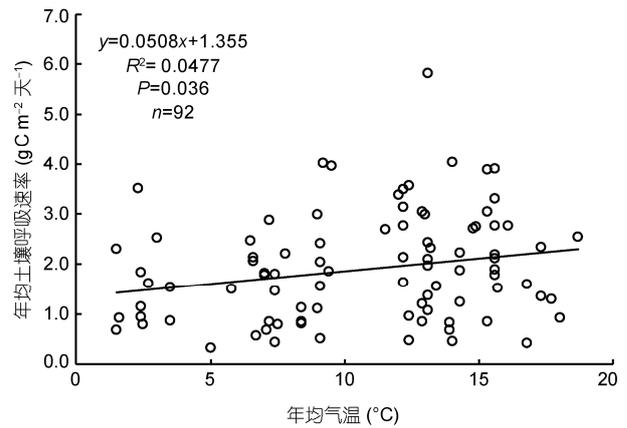


图 3 中国农田土壤呼吸与年均气温关系

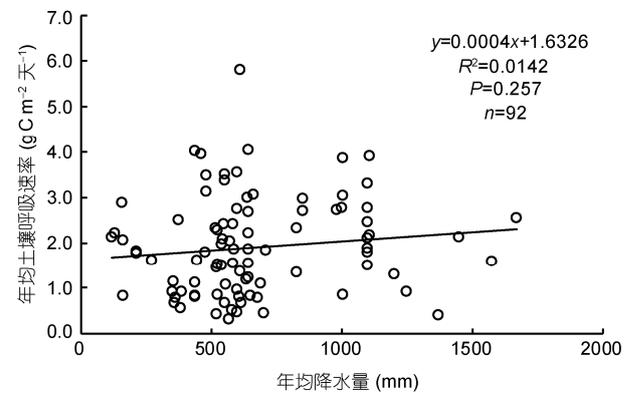


图 4 中国农田土壤呼吸与年均降水量关系

表 2 不同土地利用类型土壤呼吸速率比较

土地利用类型	土壤呼吸速率( $\text{g C m}^{-2} \text{年}^{-1}$ )					
	最低	最高	$\bar{x} \pm \text{SE}$	5%显著性	变异系数(%)	$n$
旱作	62.1	2376.2	$705.5 \pm 20.3$	a	62.4	471
水作	142.4	1186.3	$537.4 \pm 46.5$	b	50.5	34
旱作+水作	62.1	2376.2	$694.2 \pm 19.3$		62.3	505

表 3 不同作物类型间土壤呼吸速率比较

作物类型	土壤呼吸速率( $\text{g C m}^{-2} \text{天}^{-1}$ )					
	最低	最高	$\bar{x} \pm \text{SE}$	5%显著性	变异系数(%)	$n$
大豆	0.79	5.19	$2.44 \pm 0.59$	a	59.46	30
棉花	1.05	4.82	$2.90 \pm 0.27$	a	26.60	26
水稻	0.44	3.64	$1.57 \pm 0.51$	b	51.44	34
小麦	0.23	4.45	$1.41 \pm 0.59$	b	58.93	186
玉米	0.28	9.99	$2.87 \pm 0.74$	a	73.76	205
大豆+棉花+水稻+小麦+玉米	0.23	9.99	$2.19 \pm 0.08$		77.37	481

他影响因子时, 土壤呼吸速率会随着土壤温度的升高大体呈指数上升,  $Q_{10}$  值为 1.94 左右; 而随着土壤含水量的升高土壤呼吸速率表现为线性增长。

### 2.6 土壤呼吸与 NPP 的关系

图 7 显示了农作物生产力对土壤呼吸的可能影响。年均土壤呼吸速率随 NPP 增加呈指数增长, 相关性

为显著( $R^2=0.1858, P<0.01$ )。NPP 越大, 土壤呼吸速率越高, 但变异程度也增加。

## 3 讨论

### 3.1 中国农田土壤呼吸特征

本研究表明, 平均而言, 中国农业区土壤呼吸速率约为  $683 \text{ g C m}^{-2} \text{ 年}^{-1}$ , 高于 Yu 等人<sup>[16]</sup>利用 GSMSR 模型估算出的中国农田生态系统土壤呼吸值  $555 \text{ g C m}^{-2} \text{ 年}^{-1}$ , 同样也高于展小云等人<sup>[9]</sup>通过整合中国区域土壤呼吸的主要研究成果估算出的中国农田生态系统平均土壤呼吸值  $469 \text{ g C m}^{-2} \text{ 年}^{-1}$ 。若按中国  $1.33 \times 10^6 \text{ km}^2$  农业用地面积计算<sup>[7]</sup>, 则整个中国农业土壤通过呼吸的年排放量大致为  $(0.90 \pm 0.02) \text{ Pg C 年}^{-1}$ 。本研究采用基于统计学的方法对田间实验的实测数据进行分析处理, 有别于 Yu 等人<sup>[16]</sup>的分析方法。基于模型的估算, 与展小云等人<sup>[9]</sup>采用的方法类似。分析方法的差异可能是导致本研究与 Yu 等人<sup>[16]</sup>的研究结果差异的主要原因。本研究采用的样本量为 573, 而展小云等人<sup>[9]</sup>的研究中农田生态系统样本量为 31, 样本数量的差异可能是估算结果差异的主要原因。此外, 从空间尺度上讲, 本研究收集的试验点遍布中国五大农业区, 涉及不同的作物类型和耕作方式, 具有比较广泛的区域代表性。从时间尺度上讲, 本研究的数据来源于 2000~2012 年的野外实测数据, 具有较大的时间尺度。对于机理模型而言, 由于缺乏对农田生态系统土壤呼吸的变化规律及其与影响因子间关系的深入研究, 导致不同模型间的估算结果差异较大; 而对于基于统计学方法的土壤呼吸半经验模型而言, 广泛的区域代表性、充足的样本量和较大的时间尺度有利于提高估算结果的准确性<sup>[17]</sup>。本研究结果可为更准确地研究中国区域碳循环以及构建区域尺度土壤呼吸模型提供依据和参数。但本研究同样存在一些不足: (i) 由于收集的文献大多没有进行全年观测, 大约有 1/2 的月均土壤呼吸值是通过差值法补齐的, 这将影响到研究结果的准确性; (ii) 不同文献对土壤呼吸的观测方法和观测频率有所差异, 在生长季和非生长季的测量频率可能不一样, 原始文献未能提供取样策略的具体细节, 难以在数据标准化过程中采取恰当处理, 这将影响到对土壤呼吸估算的误差; (iii) 本研究估算中国农业区土

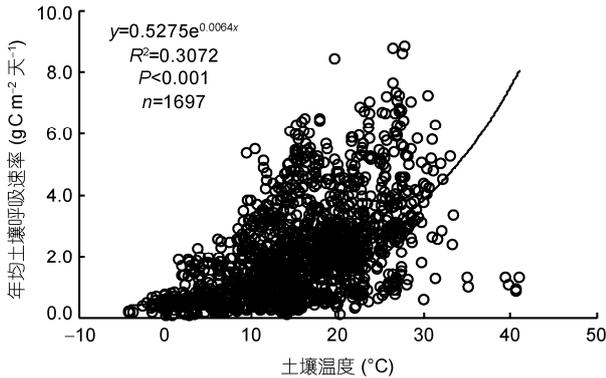


图 5 土壤呼吸与土壤温度的关系

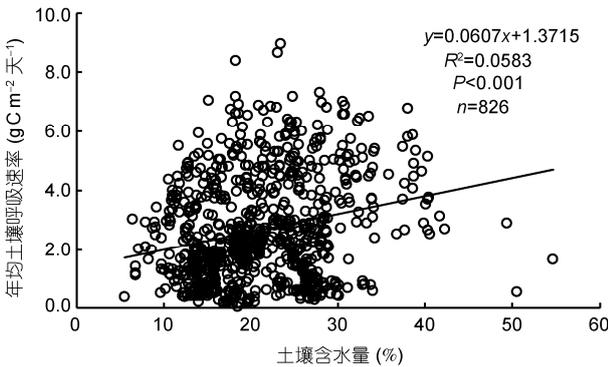


图 6 土壤呼吸与土壤含水量的关系

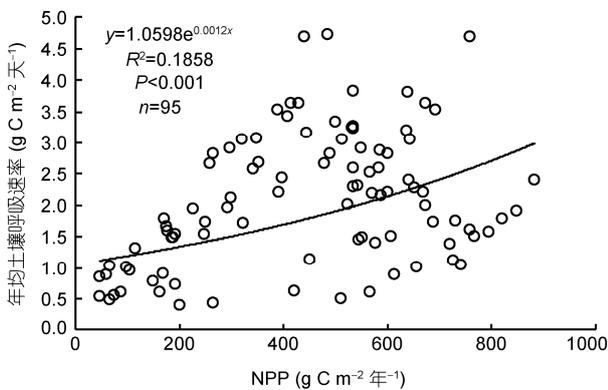


图 7 土壤呼吸与 NPP 的关系

壤呼吸速率的方法是按区划分,再计算5个农业区的平均值,在空间尺度上赋予了各观测点同等的权重,这可能对全局性最终结果的准确性造成影响。

中国5个典型农业区土壤呼吸特征表现为从南到北呈递减的趋势,且南北差异显著( $P < 0.05$ )。不同农业区间气候特征的差异是影响南北农业区土壤呼吸速率的主要原因。我国南方地区气温较高、降水量较大,而西北内陆地区和青藏高原气温较低、降水量较少,导致土壤呼吸量最高的区域主要集中在南方地区,而西北内陆地区和青藏高原的土壤呼吸量相对较低<sup>[17]</sup>。此外,土壤呼吸速率还受到农业管理方式的影响。免耕等保护性耕作措施能够明显降低土壤呼吸作用<sup>[19-21]</sup>,秸秆还田则可能显著增加土壤呼吸速率<sup>[22-25]</sup>,施肥通过促进植物的生长发育影响土壤呼吸速率<sup>[26-29]</sup>。本研究中,华南区和西南区较其他3个区更为温暖和湿润,可能是导致其土壤呼吸速率较高的主要原因,因为在全国尺度上土壤呼吸速率随着土壤温度和含水量的上升而增加。华南区和西南区气候条件和耕作方式都较为相似,这可能是两个农业区的土壤呼吸差异不显著的原因。

5个典型农业区的土壤呼吸速率季节变化特征明显,夏季土壤呼吸速率明显高于冬季。这主要是因为土壤呼吸作用受气候因子<sup>[19]</sup>和植被生长的影响<sup>[30,31]</sup>。夏季植物生长旺盛,光合作用强烈,增进光合产物向土壤的输送,同时较高的土壤温度也会增强土壤微生物和根系的活性,从而促进土壤呼吸作用<sup>[32,33]</sup>。华南和西南农业区的土壤呼吸分别在5和6月突然下降然后回升的现象,主要和水稻种植与生长有关。在淹水的条件下,稻田土壤 $\text{CO}_2$ 的排放会受到抑制,原因为过高的土壤含水量会限制土壤 $\text{O}_2$ 的扩散<sup>[34]</sup>,也会抑制植物根系<sup>[35]</sup>和好氧微生物的活性<sup>[36]</sup>,从而导致土壤 $\text{CO}_2$ 排放的降低。西北农业区由于很少种植水稻,因而没出现土壤呼吸随温度上升反而下降的现象。华北和东北农业区由于水稻不是主要的农作物,因而这种现象不明显。东北区农田的土壤呼吸总是低于其他地区农田同期的呼吸值,应该是该区较低的气温或土壤温度所致。

### 3.2 不同土地利用类型对土壤呼吸的影响

本研究对水作和旱作两种土地利用类型下的土壤呼吸进行了比较分析。水作方式以水稻种植为主,在水稻生长季长期淹水或维持高的土壤湿度。旱作

方式则主要种植玉米和棉花,土壤含水量较低,土壤温度和含水量是导致不同土地利用类型下土壤呼吸差异的主要因素<sup>[37-42]</sup>。在冬季,水旱轮作模式的农田要么种植旱作农作物,如小麦,油菜(*Brassica napus* L.)等,要么处于休耕状态,不同的耕作模式下土壤含水量的差异不明显。同时,由于冬季土壤温度较低,两种土地利用类型下的土壤呼吸作用都比较微弱,耕作模式对土壤呼吸的影响相对较小。在作物生长旺盛的夏季土壤温度较高,土壤呼吸作用强烈,在水作方式下,此时土壤大多处于淹水状态,抑制了土壤呼吸作用,导致水作方式下的年均土壤呼吸速率低于旱作方式下的土壤呼吸。

除了土壤温度和含水量2个主要影响因素外,不同土地利用类型中土壤有机碳含量、土壤有机质稳定性和土壤热传导特性的差异也可能导致两种耕作方式下土壤呼吸的差异<sup>[43]</sup>。周洪华等人<sup>[38]</sup>的研究结果还表明,土地利用方式还能通过改变土壤电导率、pH、盐分含量及机械组成等影响土壤呼吸速率。而旱作和水作方式下的田间管理措施的差异,如施肥、翻耕、排灌条件等,将导致两种土地利用方式下的土壤电导率、pH、盐分含量及机械组成等理化性质大不相同,这也可能影响土壤呼吸速率。

### 3.3 作物种类对土壤呼吸速率的影响

生物因子可以通过影响土壤微气象和结构、凋落物数量和质量以及根系呼吸作用,从而影响土壤呼吸作用<sup>[44]</sup>。本研究中,玉米、棉花和大豆生长季的土壤呼吸速率显著高于小麦和水稻的土壤呼吸速率。玉米、棉花和大豆3种夏季作物由于生长季气温较高,土壤呼吸作用比冬季作物小麦更强烈。而同样生长于夏季的水稻则受到土壤水分的抑制,导致其土壤呼吸速率较低。小麦生长期较低的土壤呼吸本质上不反映小麦对土壤呼吸的影响,这主要是低温的作用。作物自身的生物特性,包括光合作用强度、根系生物量、NPP等也会对土壤呼吸有直接的影响。植物光合作用被认为是土壤呼吸作用的物质基础来源<sup>[45]</sup>,土壤呼吸作用随植物光合作用的增强而上升<sup>[33,46,47]</sup>。而植物根系是土壤呼吸作用的主要参与者,根系生物量和根系活性决定着土壤呼吸作用的强弱<sup>[48-52]</sup>。此外,NPP能够影响植物地上和地下凋落物对土壤碳的输入,以及土壤微生物的活性<sup>[53]</sup>,因而土壤呼吸作用与NPP存在相关关系<sup>[54]</sup>。

在本研究中,大豆、棉花、玉米和水稻 4 种作物的生长季接近(大豆和棉花生长季为 6~10 月,玉米和水稻生长季为 5~9 月),除水稻是水作作物外,其他 3 种作物都是旱作作物. 4 种作物之间的土壤呼吸速率差异性表现为旱作作物之间不显著,旱作与水作作物之间显著. 这说明土壤含水量是导致作物类型间土壤呼吸速率差异的主要原因. 相对于温度和水分等外部因素,作物自身对土壤呼吸速率的直接影响差异不明显.

### 3.4 影响土壤呼吸的主要因素

环境因子对土壤呼吸的影响主要体现在两方面: (i) 影响土壤中的生物活动状况; (ii) 影响土壤中 CO<sub>2</sub> 传输的物理过程<sup>[54]</sup>. 影响土壤呼吸的主要环境因素有温度、湿度、植被类型和土壤理化性质等<sup>[55-59]</sup>, 在宏观层面上可将其归纳为气候因素、植被因素和土壤因素<sup>[60]</sup>. 本研究的分析显示,土壤呼吸与年均气温、土壤温度、土壤含水量和 NPP 均呈显著相关 ( $P < 0.01$ ), 但与年均降水量之间的相关性不显著.

大量的研究已表明,土壤呼吸与年均气温<sup>[61-63]</sup>、土壤温度<sup>[4,53,64]</sup>、土壤含水量<sup>[2,65,66]</sup>和 NPP<sup>[54,65]</sup>之间呈显著相关关系,本研究显示,在宏观的空间格局上这些关系仍然存在. 有别于单点的时间序列研究,宏观格局分析只能对呼吸与主要影响因子间的关系作概括的趋势描述,难以提供精确的定量分析. 同时,由于数据的局限性和为研究方便起见,本研究只考虑了单因素对土壤呼吸的影响,而没有进一步分析多因素的综合影响,对结果的准确性会有一些影响.

大量研究通常认为,土壤呼吸与年均降水量之间呈显著相关关系<sup>[62,63,67]</sup>. 陈书涛等人<sup>[17]</sup>的研究表明,土壤呼吸与年均降水量呈显著正相关. 这种相关性是基于降水量与土壤水分条件的关联性,在自然生态系统中,高的降水量通常导致高的土壤含水量. 但农田生态系统有别于其他陆地生态系统,除了受环境因素的影响外还受到频繁的人为干扰. 在年均降水量较低的农业区采取人工灌溉的耕作措施非常普遍,因而年均降水量对农田生态系统土壤的水分状况或对土壤呼吸的影响没有像其他陆地生态系统那样显著. 韩广轩等人<sup>[18]</sup>认为,耕作、施肥、灌溉等田间管理措施会直接或间接地影响作物生长和环境因子的时空分布,从而导致土壤呼吸速率在区域尺度上的空间分布与各地的年均气温和年均降水量没有

显著的相关关系. 因此,降水量不是一个描述农田土壤呼吸变化的恰当指标. 在模拟估算农田土壤呼吸时应该采用土壤湿度作为模型的参数,或者对不同情境下,土壤湿度与降水间的关系有恰当的定义.

### 3.5 不确定性分析

对本研究分析结果可能产生影响的因素主要有以下几方面: (i) 不同研究采用的土壤呼吸观测方法不一致,包括碱吸收法、静态箱-气相色谱法和红外气体分析仪法(infrared gas analyser, IRGA 法). 对于不同的土壤呼吸观测方法,国内外已有大量的比较研究<sup>[68-72]</sup>,而碱吸收法作为早期的土壤呼吸测定方法已被认为严重低估了土壤呼吸结果<sup>[73-75]</sup>. 因此,观测方法的差异可能会对本研究的分析结果产生影响; (ii) 观测频率的差异. 不同文献在对土壤呼吸进行野外观测时采取的观测频率、观测周期有所不同. 在数据插补和整合时很难对观测数据赋予恰当的权重,这可能增加最终结果的误差; (iii) 施肥、灌溉、耕作等田间管理措施对土壤呼吸的影响较大. 本研究根据耕作制度的差异将中国农田生态系统划分成 5 个典型农业区,但在每一个农业区内耕作差异还是普遍存在的. 这也可能是不同农业区和作物类型间土壤呼吸值具有较大变异系数的原因之一; (iv) 在对文献中的空白数据进行插补时,本研究采用的数据插补法是以整个农业区的平均土壤呼吸值为基础,通过计算各月平均呼吸值占总呼吸值的比例推算各观测样点缺失月份的土壤呼吸值. 这种数据插补法是比较粗糙的,通常只能对呼吸变化的平均趋势给出比较合理的估计,而不适宜做精确分析; (v) 本研究对西北农业区的数据收集偏少,西南和华南农业区的试验点分布不均匀,这种数据分布的不平衡也可能会对本研究分析结果产生一定影响.

## 4 结论

中国各农业区土壤呼吸在时间尺度上均呈现出明显的季节变化特征,夏季土壤呼吸速率高于冬季. 而在空间尺度上,表现出从南到北逐步减小的趋势. 全国农业土壤的平均呼吸速率为  $(682.8 \pm 18.3) \text{ g C m}^{-2} \text{ 年}^{-1}$ , 年呼吸总量为  $(0.90 \pm 0.02) \text{ Pg C 年}^{-1}$ , 其中华北区的贡献最大,约占全国的 32%. 旱作土壤的呼吸速率明显高于水作. 不同作物类型间土壤呼吸速率表

现为: 棉花>玉米>大豆>水稻>小麦. 耕作方式和作物种类对其土壤呼吸的影响受土壤温度和湿度的制约.

农田土壤呼吸速率与土壤温度、含水量和 NPP 呈显著正相关, 但土壤温度对呼吸速率变化的解释性高于含水量和 NPP.

## 参考文献

- 1 Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Glob Change Biol*, 1995, 1: 77–91
- 2 Raich J W, Potter C S, Hagawai D B. Interannual variability in global soil respiration, 1980–1994. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 800–812
- 3 Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, et al. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 29–70
- 4 Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464: 579–582
- 5 周广胜. 全球碳循环. 北京: 气象出版社, 2003
- 6 Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7–20
- 7 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放. 第四纪研究, 2003, 23: 493–503
- 8 赵生才. 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势——第 236 次香山科学会议侧记. 地球科学进展, 2005, 20: 587–590
- 9 展小云, 于贵瑞, 郑泽梅, 等. 中国区域陆地生态系统土壤呼吸碳排放及其空间格局——基于通量观测的地学统计评估. 地理科学进展, 2012, 31: 97–108
- 10 李学柱. 耕地土壤空气组成(CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)及土壤呼吸强度的测定方法. 土壤通报, 1961, 4: 61–65
- 11 钟荣亮, 周乐民. 土壤呼吸的特性及电导法测定土壤呼吸强度的研究. 土壤肥料, 1981, 5: 36–38
- 12 郑洪元. 生态系统研究中土壤呼吸、土壤酶活性及土壤生物量的测定. 生态学杂志, 1986, 5: 50–53, 63
- 13 杨涛, 姜文波, 孙希春, 等. 不同植被类型高山草甸土呼吸作用的研究. 土壤学报, 1989, 26: 186–192
- 14 宋文质, 王少彬, 苏维瀚, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放研究. 环境科学, 1996, 17: 85–88, 92
- 15 Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Glob Change Biol*, 2003, 9: 536–546
- 16 Yu G R, Zheng Z M, Wang Q F, et al. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation. *Environ Sci Technol*, 2010, 44: 6074–6080
- 17 陈书涛, 黄耀, 邹建文, 等. 中国陆地生态系统土壤呼吸的年际间变异及其对气候变化的响应. 中国科学: 地球科学, 2012, 42: 1273–1281
- 18 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望. 植物生态学报, 2008, 3: 719–733
- 19 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律. 环境科学学报, 2006, 26: 992–999
- 20 孙小花, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2009, 20: 2173–2180
- 21 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. 中国农业科学, 2009, 42: 3354–3360
- 22 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO<sub>2</sub> 释放和土壤微生物量的影响. 应用生态学报, 2004, 15: 469–472
- 23 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施肥对农田土壤呼吸的影响. 生态学报, 2005, 25: 91–95
- 24 贺京, 李涵茂, 方丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响. 中国农学通报, 2011, 27: 246–250
- 25 李玮, 张佳宝, 张丛志. 秸秆还田方式和氮肥类型对黄淮海平原夏玉米土壤呼吸的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20: 842–849
- 26 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. 土壤学报, 2007, 44: 1028–1035
- 27 孟磊, 丁维新, 何秋香, 等. 长期施肥对冬小麦/夏玉米轮作下土壤呼吸及其组分的影响. 土壤, 2008, 40: 725–731
- 28 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态. 生态学报, 2009, 29: 2551–2559
- 29 吴会军, 蔡典雄, 武雪萍, 等. 不同施肥条件下小麦田土壤呼吸特征研究. 中国土壤与肥料, 2010, 6: 70–74
- 30 刘巧辉, 黄耀, 郑循华. 基于 BaPS 系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨. 环境科学学报, 2005, 25: 1105–1111
- 31 闫静静, 杨兰芳, 庞静. 大豆和棉花生长对土壤呼吸的影响. 作物学报, 2010, 36: 1559–1567
- 32 陈泮勤. 地球系统碳循环. 北京: 中国科学出版社, 2004. 266–268
- 33 杨兰芳, 蔡祖聪, 祁士华. 玉米生长和光合作用对土壤呼吸  $\delta^{13}\text{C}$  的影响. 生态学报, 2007, 3: 1072–1078
- 34 Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Glob Change Biol*, 1998, 4: 217–227
- 35 Pangle R E, Seiler J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO<sub>2</sub> efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont. *Environ Pollut*, 2002, 116: 85–96
- 36 Skopp J, Jawson M D, Doran D W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54: 1619–1625
- 37 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱荒漠区不同土地利用/覆盖类型土壤呼吸速率的季节变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36:

68-76

- 38 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. 地理科学, 2011, 2: 190-196
- 39 褚金翔, 张小全. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分. 生态学报, 2006, 26: 1693-1700
- 40 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区不同土地利用方式下土壤呼吸. 生态学杂志, 2007, 26: 2021-2027
- 41 齐丽彬, 樊军, 邵明安, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用类型土壤呼吸季节变化及其环境驱动. 生态学报, 2008, 11: 5428-5436
- 42 李娟, 孙会民, 周朝彬, 等. 准噶尔盆地南缘两种土地利用方式土壤呼吸特征. 西北农业学报, 2011, 20: 184-189
- 43 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局. 环境科学, 2003, 24: 23-32
- 44 Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. Biogeochemistry, 2000, 48: 71-90
- 45 Lohila A, Aurela M, Regina K, et al. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. Plant Soil, 2003, 251: 303-317
- 46 Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. New Phytol, 2000, 147: 141-154
- 47 黄湘, 李卫红, 马建新, 等. 通过改变光热条件分析胡杨群落光合作用对土壤呼吸速率的影响. 中国沙漠, 2011, 31: 1167-1173
- 48 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO<sub>2</sub> 排放的影响. 环境科学, 2004, 25: 1-6
- 49 韩广轩, 朱波, 江长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素. 植物生态学报, 2006, 30: 450-456
- 50 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. 生态学报, 2007, 12: 5254-5261
- 51 袁渭阳, 李贤伟, 张健, 等. 不同年龄巨桉林土壤呼吸及其与土壤温度和细根生物量的关系. 林业科学, 2009, 45: 1-8
- 52 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2010, 21: 2472-2478
- 53 Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. Glob Biogeochem Cycle, 1995, 9: 23-26
- 54 Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol, 1992, 44: 81-99
- 55 Boone R D, Nadelhoer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. Nature, 1998, 396: 570-572
- 56 Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. Soil Biol Biochem, 2000, 32: 1625-1635
- 57 Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. Soil Biol Biochem, 2001, 33: 155-165
- 58 Sánchez M L, Ozores M I, López M J, et al. Soil CO<sub>2</sub> fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. Agr Forest Meteorol, 2003, 118: 85-95
- 59 Dilustro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests. For Ecol Manage, 2005, 204: 85-95
- 60 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展. 环境科学, 2011, 8: 2184-2192
- 61 Bahn M, Rodeghiero M, Anderson-Dun M, et al. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply. Ecosystems, 2008, 11: 1352-1367
- 62 Chen S T, Huang Y, Zou J W. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties. Agr Forest Meteorol, 2010, 150: 590-605
- 63 Wang W, Chen W L, Wang S P. Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: global patterns and responses to temperature and precipitation. Soil Biol Biochem, 2010, 42: 1236-1244
- 64 Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. Funct Ecol, 1994, 8: 315-323
- 65 Reichstein M, Freibauer R A, Tenhunen A, et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. Glob Biogeochem Cycle, 2003, 17: 1104
- 66 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. 生态学杂志, 2008, 10: 1698-1705
- 67 Wang W, Fang J Y. Soil respiration and human effects on global grasslands. Global Planet Change, 2009, 67: 20-28
- 68 Nakadai T, Koizumi H, Usami Y, et al. Examination of the methods form easuring soil respiration in cultivated land: effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. Ecol Res, 1993, 8: 65-71
- 69 Nay S M, Mattson K G, Bormann B T. Biases of chamber methods form easuring soil CO<sub>2</sub> efflux demonstrated with a laboratory apparatus. Ecology, 1994, 75: 2460-2463
- 70 Bekku Y, Koizumi H, Nakadai T, et al. Examination of four methods form easuring soil respiration. Appl Soil Ecol, 1997, 5: 247-254
- 71 King J A, Harrison R. Measuring soil respiration in the field: an automated closed chamber system compared with portable IRGA and alkali absorption methods. Commun Soil Sci Plant Anal, 2002, 33: 403-423
- 72 谢锦升, 杨玉盛, 曾宏达, 等. 侵蚀红壤植被恢复后土壤呼吸日动态及日呼吸速率测定方法比较. 亚热带资源与环境学报, 2006, 4: 21-29

- 73 杨晶, 黄建辉, 詹学明, 等. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸的日动态观测与测定方法比较. 植物生态学报, 2004, 3: 318–325
- 74 李玉强, 赵哈林, 李玉霖, 等. 沙地土壤呼吸观测与测定方法比较. 干旱区地理, 2008, 5: 680–686
- 75 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱地农田两种土壤呼吸测定方法的比较. 中国土壤与肥料, 2011, 4: 1–4, 29

## Soil Respiration and Driving Factors of Farmland Ecosystems in China

JIANG GuoFu, LIU Chang, LI JinQuan, CHENG Hao & FANG ChangMing

*Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*

Soil respiration plays a crucial role in global carbon (C) budget. It is important to conduct the research in the typical agricultural regions, China to understand its spatial and temporal variations and their controlling factors. This will benefit not only quantitative evaluation of soil respiration at a regional scale, but also the agricultural C budget in China and even in the world. In this study, we integrated soil respiration data in agricultural ecosystems between 2000 and 2012 in China, and analyzed the seasonal and spatial variations and the factors influencing soil respiration in five typical agricultural regions (Southeast, Southwest, North, Northwest, and Northeast China). The results showed that obvious seasonal variation was observed in five agricultural regions. The annual mean rate of soil respiration in farmland ecosystems of China was  $(682.8 \pm 18.3) \text{ g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ , and total C efflux from soil respiration in agricultural region of China was about  $0.90 \text{ Pg C year}^{-1}$ . The order of soil respiration rate in five agricultural regions was Southeast>Southwest>North>Northeast>Northwest. The significant difference in soil respiration rates was found between water-cultivation and dry-cultivation regions ( $P < 0.05$ ). Soil respiration in dry-cultivation regions was 1.3 times higher than that in water-cultivation ones. Soil respiration rate was significantly affected by crop types ( $P < 0.05$ ), with an order of cotton>corn>soybean>rice>wheat. Significant correlations were found in soil respiration with annual mean temperature, soil temperature, soil water content, and NPP ( $P < 0.01$ ). There was no significant correlation between soil respiration and annual precipitation.

**farmland ecosystem, soil respiration, impact factor, spatial and temporal variations**

doi: 10.1360/N052013-00055