

中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望

韩广轩^{1,2} 周广胜^{1*} 许振柱¹

(1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

(2 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 烟台 264003)

摘要 农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 占全球陆地面积的 10.5%, 其 CO₂ 排放量占人为温室气体排放量的 21%~25%; 由于农田生态系统受到强烈的人为干扰, 因此农田生态系统土壤呼吸作用及其影响因素对准确评估陆地生态系统碳收支具有重要的意义。中国是个有悠久历史的农业大国, 不仅为农田土壤作用的研究提供了天然的实验室, 而且中国农田土壤呼吸作用的研究对全球的碳循环研究及碳收支准确评估具有非常重要的示范与指导意义。该文综述了近 10 年来中国农田生态系统土壤呼吸作用研究进展, 指出水热因子、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; 作物根系呼吸作用占土壤作用的比例在 13%~77.2% 之间, 存在极大的不确定性; 合理施肥、秸秆还田和免耕有助于农田生态系统土壤呼吸作用减排和固碳。指出了中国农田生态系统土壤呼吸作用拟重点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。

关键词 农田生态系统 土壤呼吸作用 时空变异性 根系呼吸作用 减排措施

RESEARCH AND PROSPECTS FOR SOIL RESPIRATION OF FARMLAND ECOSYSTEMS IN CHINA

HAN Guang-Xuan^{1,2}, ZHOU Guang-Sheng^{1*}, and XU Zhen-Zhu¹

¹State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China, and

²Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract Farmland ecosystems are important terrestrial ecosystems, representing about 10.5% of the earth's surface, and their CO₂ emission amounts about 21% - 25% of anthropogenic greenhouse gases emission. Farmland ecosystems are affected intensively by human activities; therefore, soil respiration of farmland ecosystems and their impacts are very important in the carbon budget of terrestrial ecosystems, as well as the global carbon cycle and carbon budget. With a long history of extensive agriculture, China provides a laboratory for soil respiration research. We review the previous decade of research advances in soil respiration of farmland ecosystems in China. Heat-water factors, crop biological characteristics and agricultural management activities played key roles in regulating the spatial and temporal variations of soil respiration. Root respiration accounts for 13% - 77% of soil respiration, but the amounts are uncertain. Rational fertilization, straw return to soil and no-tillage are useful to soil CO₂ emission reduction and soil carbon sequestration. We discuss key issues and further tasks, including comparison of soil respiration among typical farmland ecosystems in different areas, spatial variations of soil respiration, simulation of factors controlling soil respiration, and mitigation options of soil CO₂ emission.

Key words farmland ecosystems, soil respiration, spatial and temporal variations, root respiration, mitigation options

DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.03.022

全球碳库主要包括大气碳库、海洋碳库、陆地碳库和岩石圈中的碳。陆地碳库约为 1 750 Gt (周广胜和王玉辉, 2003), 其中土壤有机碳贮量约是植被

碳库的 3 倍、大气碳库的 2 倍 (Granier *et al.*, 2000)。因此, 土壤碳库的微小变化将严重影响全球碳循环。土壤呼吸作用是土壤碳库变化的主要途径之一, 主

收稿日期: 2007-03-23 接受日期: 2007-11-12

基金项目: 国家杰出青年基金(40625015)和国家重点基础研究发展计划(2004CB418507-1)

感谢中国科学院植物研究所王玉辉、蒋延玲、贾丙瑞、王凤玉、王旭、周莉、王云龙、李祎君和林祥磊等对本项研究工作的支持与帮助

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

E-mail of the first author: gchan@yic.ac.cn

要包括来自植物根系的自养呼吸作用和土壤微生物异养呼吸作用,在全球碳循环中起着关键作用(Buchmann, 2000; Schlesinger & Andrews, 2000)。土壤呼吸速率相对小的改变将显著改变大气 CO₂ 浓度和土壤碳的累积速率,从而加剧或减缓全球气候变暖(Schlesinger & Andrews, 2000);而气候变暖将进一步增强土壤呼吸作用,释放出更多的 CO₂,进一步加剧全球气候变暖(Sánchez *et al.*, 2003)。因此,弄清土壤呼吸作用的变化规律及其控制机理不仅是准确评估全球碳收支的关键,亦是制定应对全球变化策略的关键。

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分。全球耕地面积约 1 369 Mhm², 占全球陆地面积的 10.5% (FAO, 2001)。据统计,农业源排放的 CO₂ 占人为温室气体排放量的 21% ~ 25% (林而达, 2001)。不仅如此,农田生态系统还受到强烈的人为干扰,是全球碳库中最活跃的部分。在全球陆地生态系统碳库中,只有农田生态系统可以在较短的时间尺度上调节碳库(赵生才, 2005)。在自然因素和农业管理(耕作、施肥和灌溉等)的双重作用下,农田土壤呼吸作用不仅存在空间变化,亦存在很大的时间变化(李长生等, 2003),影响着区域乃至全球碳循环。中国是一个有悠久历史的农业大国,农业用地面积约 1.33×10^7 km², 占国土总面积的 14% (李

长生等, 2003), 农田生态系统土壤呼吸作用在我国生态系统碳循环中具有重要的地位。

本文试图从土壤呼吸作用的时空变异、影响因素、减排和增汇措施等方面综述近 10 年来我国农田生态系统土壤呼吸作用的最新研究成果,以增进对我国土壤呼吸作用变化规律及其控制机理的理解,进而探讨未来中国农田生态系统土壤呼吸作用的研究重点。

1 研究区域及方法

根据生态气候带、农田耕作制度及社会经济条件,我国农业种植区可分为 9 大区(《中国综合农业区划》编写组, 1981), 即东北区、内蒙及长城沿线区、黄淮海平原区、黄土高原区、长江中下游区、华南区、西南区、甘新区和青藏高原区,气候、土壤、作物以及耕作制度在这 9 大区差异很大。目前,我国农田土壤呼吸作用观测研究主要集中在除内蒙及长城沿线区、华南区和甘新区以外的地区(图 1), 作物类型包括小麦 (*Triticum aestivum*)、玉米 (*Zea mays*)、水稻 (*Oryza sativa*)、大豆 (*Glycine max*)、棉花 (*Gossypium hirsutum*) 和油菜 (*Brassica napus*) (表 1)。

关于我国土壤呼吸作用的测定方法主要包括碱液吸收法、静态箱/气相色谱法、红外 CO₂ 分析仪和气压过程分离法(表 1), 其中红外 CO₂ 分析仪法较

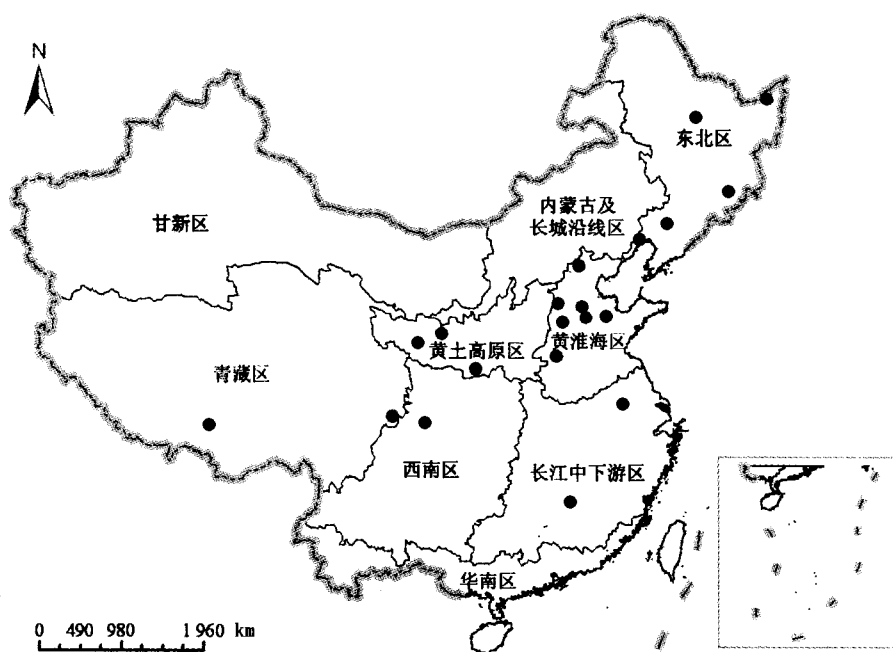


图 1 中国农田生态系统土壤呼吸作用的观测地点

Fig. 1 Locations of soil respiration measurements of farmland ecosystems in China

表 1 中国农田生态系统土壤呼吸作用的观测地点与观测方法
Table 1 Measurement sites and methods of soil respiration in farmland ecosystems of China

地点 Site	土壤类型 Soil	测定方法 Methods	作物类型 Agrotype	测定时间 Time	土壤呼吸速率 Soil respiration rate (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	参考文献 Reference
三江平原 Sanjiang Plain	潜育草甸沼泽土 Gleying meadow marsh soil	红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	大豆 <i>Glycine max</i>	生长期 Growing season	321.7	杨青和吕宪 国, 1999
长白山 Changbai Mountains	暗棕壤 Dark brown forest soil	红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	玉米 <i>Zea mays</i>	生长期 Growing season	178.5	王旭等, 2006
黑龙江海伦 Hailun, Heilongjiang Province	黑土 Black soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	水稻 <i>Oryza sativa</i>	生长期 Growing season	129.2 (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	梁巍等, 2003
辽宁沈阳市 Shenyang, Liaoning Province	潮棕壤 Aquic brown soil	静态箱/气相色谱 Static closed chamber-gas chromatograph	玉米 <i>Zea mays</i>	生长期 Growing season	215.67	王重阳等, 2006
辽宁锦州市 Jinzhou, Liaoning Province	棕壤 Brown soil	红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	玉米 <i>Zea mays</i>	生长期 Growing season	400.8	Han <i>et al.</i> , 2007a
北京海淀区 Haidian District, Beijing	潮土 Fluvo-aquic soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	2001 年生长期 Growing season of 2001	241.1	黄斌等, 2006
				2002 年生长期 Growing season of 2002	232.1	
			夏玉米 <i>Zea mays</i>	2001 年生长期 Growing season of 2001	595.8	
				2002 年生长期 Growing season of 2002	536.5	
中国农业大学 China Agricultural University	草甸褐土 Meadow cinnamon soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	530.5	强学彩等, 2004
			玉米 <i>Zea mays</i>	生长期 Growing season	707	
河北滦城县 Luancheng County, Hebei Province	潮褐土 Aquic cinnamon soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	小麦-玉米轮作 <i>Triticum aestivum-Zea mays</i> rotation	全年 Full year	186.0~204.1	陈素英和胡 春胜, 1997
			玉米 <i>Zea mays</i>	8-9 月生长盛期 Growing season (August and September)	712.8	贾金生等, 2003
		红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	水稻 <i>Oryza sativa</i>	全年 Full year	395	宋文质等, 1996
		静态箱/气相色谱 Static closed chamber-gas chromatograph	小麦 <i>Triticum aestivum</i>	全年 Full year	262	

冀鲁豫区 Huang-huai-hai Plain

东北地区 Northeast

表 1 (续) Table 1 (continued)

地点 Site	土壤类型 Soil	测定方法 Methods	作物类型 Agrotype	测定时间 Time	土壤呼吸速率 Soil respiration rate ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	参考文献 Reference
河北曲周县 Quzhou County, Hebei Province	潮土 Fluvo-aquic soil	红外 CO_2 分析仪 Infrared CO_2 analyzer	夏玉米 <i>Zea mays</i>	生长期 Growing season	773.1	王立刚等, 2006
河北吴桥县 Wuqiao County, Hebei Province	潮土 Fluvo-aquic soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	冬小麦-夏玉米轮作 <i>Triticum aestivum-Zea mays</i> rotation	生长期 Growing season	743~934	孟凡乔等, 2006
山东桓台县 Huantai County, Shandong Province	砂姜黑土 Indicotic black soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	冬小麦-夏玉米轮作 <i>Triticum aestivum-Zea mays</i> rotation	全年 Full year	205.7	崔玉亭等, 1997
山东禹城市 Yucheng County, Shandong Province	中壤土 Solied soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	冬小麦-夏玉米轮作 <i>Triticum aestivum-Zea mays</i> rotation	全年 Full year	372.2	孟凡乔和吴 文良, 1994
黄淮海平原 Huang-huai-hai Plain		静态箱/气相色谱 chromatograph	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	199.1	陈述悦等, 2004
		静态箱/气相色谱 chromatograph	冬小麦-夏玉米轮作 <i>Triticum aestivum-Zea mays</i> rotation	全年 Full year	333.7	陈述悦, 2004
		静态箱/气相色谱 chromatograph	棉花 <i>Gossypium hirsutum</i>	全年 Full year	177.2	
河南封丘县 Fengqiu County, Henan Province	潮土 Fluvo-aquic soil	静态箱/气相色谱 chromatograph	小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	68.2	孟磊等, 2005
		静态箱/气相色谱 chromatograph	玉米 <i>Zea mays</i>	生长期 Growing season	257.2	
宁夏固原县 Guyuan County, Ningxia Province	灰褐土 Gray drab earth	碱液吸收法 Alkali absorption method		生长期 Growing season	84.2	吴建国等, 2003
陕西杨凌市 Yangling, Shanxi Province	娄土 Lou soil	静态箱/气相色谱法 Static closed chamber-gas chromatograph	小麦-玉米轮作 <i>Triticum aestivum-Zea mays</i> rotation	全年 Full year	189.4	戴万宏等, 2004
甘肃定西县 Dingxi County, Gansu Province	黄绵土 Loessal soil	碱液吸收法 Alkali absorption method	春小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	151.1 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	孟凡乔等, 2006
长江中下游区 Yangtze River Middle and Lower	黄棕壤 Yellow-brown earth	气压过程分离法 Barometric process separation method	大豆 <i>Glycine max</i>	生长期 Growing season	162.1 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	刘巧辉等, 2005
		静态箱/气相色谱法 Static closed chamber-gas chromatograph	玉米 <i>Zea mays</i>	生长期 Growing season	326.0 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	
		静态箱/气相色谱法 Static closed chamber-gas chromatograph	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	247.2	孙文娟等, 2004

表 1 (续) Table 1 (continued)

地点 Site	土壤类型 Soil	测定方法 Methods	作物类型 Agrotype	测定时间 Time	土壤呼吸速率 Soil respiration rate (mg m ⁻² h ⁻¹)	参考文献 Reference
长江中下游区 Middle and Lower Yangtze River		静态箱/气相色谱法 Static closed chamber-gas chromatograph	水稻 <i>Oryza sativa</i>	生长期 Growing season	215.3	孙文娟等, 2004
		静态箱/气相色谱 Static closed chamber-gas chromatograph	水稻 <i>Oryza sativa</i>	生长期 Growing season	198.4 ± 34.0 (无植株 No planted soil)	邹建文等, 2003
	江西泰和县 Taihe County, Jiangxi Province	红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	玉米 <i>Zea mays</i>	全年 Full year	662	周志田等, 2002
			水稻 <i>Oryza sativa</i>	全年 Full year	386.8	
四川省 Sichuan Province	四川省盐亭县 Yanting County, Sichuan Province	静态箱/气相色谱 Static closed chamber-gas chromatograph	水稻 <i>Oryza sativa</i>	生长期 Growing season	121.8	韩广轩等, 2006
			小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	229.8	韩广轩等, 2004
	四川省理县 Li County, Sichuan Province	红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	白菜 <i>Brassica campestris</i>	生长期 Growing season	556.6	褚金翔和张小全, 2006
西藏拉萨 Lhasa, Tibet	冲洪积物母质 Proluvium and alluvium	静态箱/气相色谱法 Static closed chamber-gas chromatograph	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	全年 Full year	219.84	Shi et al., 2006
		红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	770.8	张宪洲等, 2003
			青稞 <i>Hordeum vulgare</i>		747.4	
			裸地 Bare land		462.5	
		红外 CO ₂ 分析仪 Infrared CO ₂ analyzer	冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	生长期 Growing season	250~1050	刘允芬, 1998
			春小麦 <i>Triticum aestivum</i>		450~770	
			玉米 <i>Zea mays</i>		300~880	
			油菜 <i>Brassica napus</i>		860~1070	

为理想(于贵瑞,2003)。由于土壤呼吸作用观测方法不同,使得资料之间的可比性差(齐志勇等,2003;刘立新等,2004)。由表1可见,不仅不同区域不同观测方法下的农田生态系统土壤呼吸作用差异很大,即使同一区内的同一种作物在同一种观测方法下的土壤呼吸作用亦存在较大差异。

2 时间变异及其控制因素

2.1 土壤呼吸作用的时间动态

农田生态系统土壤呼吸作用有明显的昼夜变化,大多表现为单峰型,且白天土壤呼吸量显著大于夜间,这与森林(Xu & Qi, 2001)、草原(贾丙瑞等,2005)和湿地生态系统(李兆富等,2003)的土壤呼吸作用日动态具有一致性。青藏高原冬小麦的土壤呼吸速率的最大值和最小值分别发生于13:00~14:00和5:00~6:00左右(张宪洲等,2003);长白山玉米农田土壤呼吸速率最大值出现在12:00左右,最小值出现在5:00左右(王旭等,2006)。

农田生态系统土壤呼吸作用还有明显的季节动态,与当地水热条件紧密相关。华北平原玉米地土壤呼吸作用在春季缓慢升高,峰值出现在温度和降水均较高的7月,之后逐步回落(孟凡乔等,2006);冬小麦-夏玉米轮作农田土壤呼吸速率在春季呈上升趋势,夏季7月初达到最高,秋季则呈下降趋势,冬季降到最低(戴万宏等,2004)。从发育期看,作物生长旺盛期土壤呼吸速率高于作物发育初期和后期(刘允芬,1998;韩广轩等,2006)。刘巧辉等(2005)研究发现,大豆和玉米根区土壤呼吸速率随根系的生长有明显的季节变化,作物生长前期呼吸作用较弱,随着作物根系生长逐渐增强,到后期又逐渐减弱。孟磊等(2005)研究发现,玉米播种后的30 d和70 d分别是营养生长及营养和生殖生长最旺盛的时期,土壤呼吸作用也在那时达到峰值,后期玉米生长衰弱,土壤呼吸降低。

2.2 土壤呼吸作用日动态控制因素

土壤温度是土壤呼吸作用日变化的主要驱动因子,土壤呼吸速率的日变化趋势与土壤温度基本一致(陈述悦等,2004),而其它环境变量,如土壤湿度、生物量和土壤性状等在一天内的变化相对较小,对土壤呼吸作用的影响不明显(Han *et al.*, 2007a)。

在一定温度范围内,土壤呼吸速率与土壤温度之间呈正相关关系(韩广轩等,2006; Han *et al.*, 2007b; 陈述悦等,2004)。一方面,温度影响土壤微生物活性,另一方面也影响根系的生长与活性,从而

影响根系呼吸。在一定温度范围内,根系呼吸作用和土壤微生物的活动均随温度升高而增强;同时,土壤温度的升高又将改变土壤有机质的物理化学状态,使之更易于分解(褚金翔和张小全,2006)。另外,土壤温度亦影响土壤中CO₂向大气的输送过程。随着土壤温度的升高,CO₂向大气的排放增强。

2.3 土壤呼吸作用季节动态控制因素

土壤呼吸作用包括3个生物学过程(植物根系呼吸作用、土壤微生物呼吸作用及动物呼吸作用)和1个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用),受温度、土壤湿度、植被和基质质量、净生态系统生产力(NEP)和植物净第一性生产力(NPP)在地上和地下的相对分配等因素影响作用(周广胜和王玉辉,2003)。关于农田生态系统土壤呼吸作用季节动态的主导影响因素通常包括水热因子、作物生长和农业管理活动等。

2.3.1 水热因子

农田生态系统由于受到灌溉等人为干预,土壤呼吸速率季节变化主要与土壤温度有关,只有在极端条件下水分才会对土壤呼吸作用起限制作用(表2)。当作物水分处于田间持水量和萎蔫系数之间时,土壤呼吸作用对水分变化不敏感,只有当土壤水分超过田间持水量或降低到永久萎蔫点以下时,土壤呼吸作用才开始下降(Kucera & Kirkham, 1971)。农田土壤湿度过低时将限制土壤微生物呼吸作用和根系呼吸作用,而土壤水分过高时则会阻塞土壤空隙,从而减少土壤中的O₂浓度,限制CO₂的释放(Pangle & Seiler, 2002; Gough & Seiler, 2004)。例如,华北平原和下辽河平原,玉米地土壤呼吸作用在夏季的峰值与低谷几乎与土壤含水量的峰值和低谷同步(陈述悦等,2004; 王重阳等,2006);在陕西关中地区,长时期夏季干旱造成的水分胁迫明显抑制玉米地的土壤呼吸速率(戴万宏等,2004),而灌溉能增加土壤呼吸作用的强度(黄斌等,2006);水稻田晒田后的土壤呼吸速率加快(周志田等,2002)。

农田生态系统土壤呼吸作用与温度的关系可以用指数函数、线性函数(刘允芬,1998)、二次函数(张宪洲等,2003)和幂函数(戴万宏等,2004)等形式表示,即使对于同一区内同一作物的土壤呼吸作用,不同研究者所用的拟合模型也不相同,如西藏拉萨的小麦农田生态系统(刘允芬,1998;张宪洲等,2003)。

2.3.2 作物生长

农田生态系统土壤呼吸作用的季节动态与作物生长有着密切联系。刘巧辉等(2005)指出,大豆和

表2 水热因子对农田生态系统土壤呼吸作用季节变化的影响
Table 2 Effects of water-heat factors on the seasonal variations of soil respiration in farmland ecosystems

作物类型 Agrotype	地点 Site	测定时间 Time	温度 Temperature		水分 Moisture	参考文献 Reference
			层次 Levels	函数关系 Function		
小麦 <i>Triticum aestivum</i>	北京 Beijing	生长季 Growing season	气温 Air temperature		灌溉增加土壤呼吸作用的强度 Irrigation could increase the rate of soil respiration	黄斌等, 2006
	山东禹城市 Yucheng County, Shandong Province	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	夏季土壤呼吸的峰值与低谷与土壤含水量同步 The maximum and minimum of soil respiration rate were positively correlated with soil water content in summer	陈述悦, 2004
	西藏拉萨 Lhasa, Tibet	全年 Full year	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function		Shi <i>et al.</i> , 2006
	西藏拉萨 Lhasa, Tibet	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	二次函数 Quadratic function		张宪洲等, 2003
	西藏拉萨 Lhasa, Tibet	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	线性函数 Linear function		刘允芬, 1998
	四川盐亭县 Yanting County, Sichuan Province	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function		韩广轩等, 2004
玉米 <i>Zea mays</i>	辽宁沈阳市 Shenyang, Liaoning Province	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	6至8月土壤呼吸的峰值与低谷与土壤含水量同步 The correlation between soil respiration and soil moisture was apparent from June to August	王重阳等, 2006
	辽宁锦州市 Jinzhou, Liaoning Province	生长季 Growing season	10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth	指数函数 Exponential function	无相关关系 No significant correlation	Han <i>et al.</i> , 2007a
	江西泰和县 Taihe County, Jiangxi Province	全年 Full year	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	降雨后排放 CO ₂ 速率加快 Soil CO ₂ efflux increased after precipitation	周志田等, 2002
	西藏拉萨 Lhasa, Tibet	生长季 Growing season	10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth	指数函数 Exponential function		刘允芬, 1998
	北京 Beijing	生长季 Growing season	气温 Air temperature	正相关 Positive correlation	不同灌溉处理间土壤呼吸的差异不明显 The differences in soil respiration among different irrigation treatments were not obvious	黄斌等, 2006
	河北曲周县 Quzhou County, Hebei Province	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	正相关 Positive correlation	与土壤含水量呈正相关 Positive correlation with soil water content	王立刚等, 2006
	小麦-玉米轮作	河北曲周县 Quzhou County, Hebei Province	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	

表 2 (续) Table 2 (continued)

作物类型 Agrotype	地点 Site	测定时间 Time	温度 Temperature		水分 Moisture	参考文献 Reference
			层次 Levels	函数关系 Function		
<i>Triticum aestivum/Zea mays</i> rotation	河北吴桥县 Wuqiao County, Hebei Province	全年 Full year	10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth	指数函数 Exponential function		崔玉亭等, 1997
	山东桓台县 Huantai County, Shandong Province	全年 Full year	气温、10 cm 土壤 温度 Air temperature, soil temperature at 10 cm depth	指数函数 Exponential function	无相关关系 No significant correlation	孟凡乔和吴文 良, 1994
	山东禹城市 Yucheng County, Shandong Province	全年 Full year	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function		陈述悦, 2004
	河北栾城县 Luancheng County, Hebei Province	全年 Full year	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	地温较稳定的时段呈极显著 正相关 Soil respiration rate was sig- nificantly correlated with soil moisture when soil temperature was relatively steady	陈素英和胡 春胜, 1997
	陕西杨凌市 Yangling, Shanxi Province	全年 Full year	10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth	幂函数 Power function	长时期夏季干旱明显影响土 壤呼吸速率 Soil water-stress led by longer drought in summer could in- fluence soil respiration rate obviously.	戴万宏等, 2004
水稻 <i>Oryza sativa</i>	江苏南京市 Nanjing, Jiangsu Province	生长季 Growing season	10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth	指数函数 Exponential function	与水层深度呈弱负相关关系 Negative correlation of CO ₂ emission with water level was perceivable	邹建文等, 2003
	江西泰和县 Taihe County, Jiangxi Province	全年 Full year	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	晒田后的土壤土壤呼吸速率 加快 The rate of soil respiration increased after the drainage of rice fields	周志田等, 2002
	四川盐亭县 Yanting County, Sichuan Province	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	与地表水深无相关关系 Relationship between soil respiration and water levels was not obvious	韩广轩等, 2006
大豆 <i>Glycine max</i>	三江平原 Sanjiang Plain	生长季 Growing season	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function	土壤水的含量过高或过低都 会抑制土壤呼吸作用 Much higher or lower soil moisture could inhibit soil respiration	杨青和吕宪 国, 1999
棉花 <i>Gossypium hirsutum</i>	山东禹城市 Yucheng County, Shandong Province	全年 Full year	5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	指数函数 Exponential function		陈述悦, 2004
白菜 <i>Brassica campestris</i>	四川理县 Li County, Si- chuan Province	生长季 Growing season	10 cm 土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth	指数函数 Exponential function		褚金翔和张 小全, 2006

玉米根区土壤呼吸速率随根系的生长有明显的季节变化,而非根区土壤呼吸速率的季节变化不明显;当玉米生长旺盛时,土壤呼吸作用也旺盛。因此,在玉米生长期间,土壤呼吸作用也可以反映玉米的生长状况(杨兰芳和蔡祖聪,2005)。盆栽试验发现,种植大豆的平均土壤呼吸速率是裸土的6.8~26.4倍,说明在植物生长期,土壤呼吸作用主要受植物生长控制(杨兰芳和蔡祖聪,2004)。水稻和玉米的土壤呼吸作用与其生物量和净第一性生产力有很好的相关性(韩广轩等,2006; Han *et al.*, 2007a)。

作物生长影响土壤呼吸作用主要反映在:1)根系呼吸作用以及微生物分解根系来源物质与植物生长密切相关。植物为根系呼吸作用提供光合产物,而根系通过呼吸作用为植物提供吸收养分和水分所需要的能量(杨兰芳和蔡祖聪,2004)。例如,在玉米生长期间,根际呼吸作用消耗的碳相当于作物净光合产物的18%~25%和净二氧化碳同化产物的24%~35%(Rochette & Flanagan, 1997)。2)植物根系是土壤呼吸作用的主要参与者,其根量与根系活性决定着根系呼吸强弱和排出CO₂的数量。Hanson等(2000)在综合分析前人的研究结果后指出,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%。3)植物生长为微生物提供基质,植物通过影响土壤中凋落物和碎屑的数量来影响微生物的生长和活性,从而影响土壤呼吸作用(Lohila *et al.*, 2003)。在植物生长期间,根系释放到根际土壤的有机物数量约占植物光合产物的15%~40%,这些有机物质绝大部分以CO₂的形式释放出来(王敬国, 1995)。

2.3.3 田间管理活动

作为人类活动最活跃的生态系统,耕作、施肥和灌溉等一系列田间管理活动将直接或间接地改变农田生态系统的土壤环境,从而影响土壤CO₂的排放速率。农田耕作是世界上最大规模的人类活动,耕作使土壤深处的土壤有机碳暴露在空气中,加速了土壤有机碳的分解,促进了土壤呼吸作用;施肥,特别是施入有机肥,可以提高农田土壤有机碳含量,增加土壤呼吸作用的底物,同时促进作物生长,从而显著提高土壤呼吸作用;灌溉一般是在土壤干旱缺水的情况下进行的,能够促进植被的生长,并增强土壤微生物的活性,最终使土壤呼吸速率加快(周志田等,2002)。

土壤耕种可以导致玉米生长前期较高的土壤呼吸速率(孟磊等,2005)。秋耕时节,土壤翻耕、化肥和有机肥的施用和秸秆还田等将使土壤微生物的活动加强,加速土壤中有有机物的分解,从而使农田土壤呼吸强度急剧增加(王立刚等,2006; 崔玉亭等,1997)。灌水后,大豆土壤呼吸作用总量和最大土壤呼吸速率均显著高于不灌水的处理(杨兰芳和蔡祖聪,2004)。在水稻生长末期排水后,土壤的通气性增强,好气微生物开始活跃,使得土壤呼吸速率呈上升趋势(梁巍等,2003)。

3 空间变异及其控制因素

3.1 区域变异性

中国幅员辽阔,具有多样的气候类型,加之各地农田田间管理方式的多样性和复杂性,使得农田土壤呼吸作用在区域尺度上存在着较大的空间变异(表1)。以冬小麦和夏玉米为例,在小麦生长季中,不同地区小麦田的土壤呼吸速率在68.2~770.8 mg·m⁻²·h⁻¹之间,变异系数达73.6%。其中,拉萨

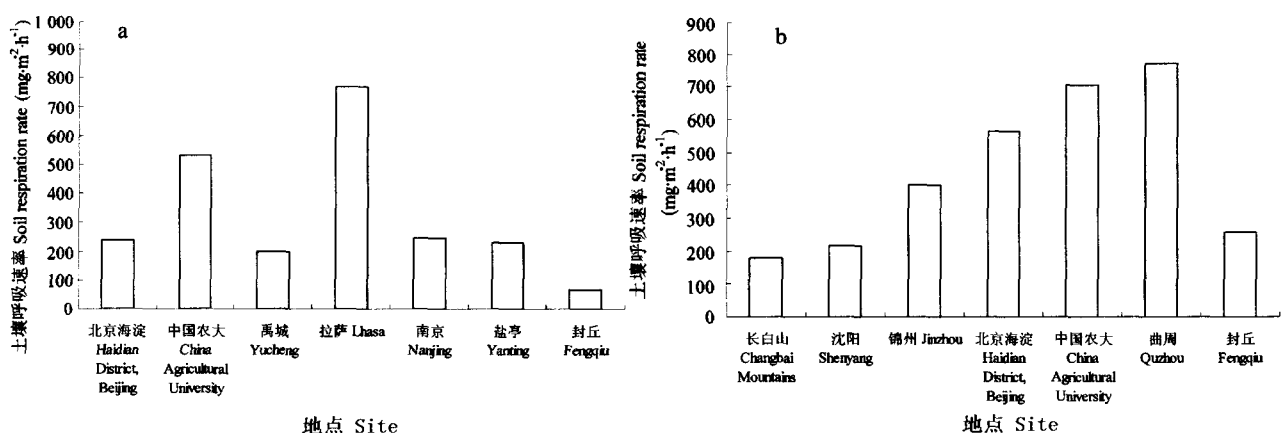


图2 冬小麦(a)和玉米(b)生长季土壤呼吸速率的空间变异

Fig.2 Spatial variations of soil respiration during the growing seasons of winter wheat (a) and maize (b)

小麦田的土壤呼吸速率最大,是河南封丘小麦地土壤呼吸作用的 11.3 倍(图 2a)。在玉米生长季中,不同地区玉米地的土壤呼吸速率在 $178.5 \sim 773.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,变异系数为 54.7%。其中,曲周玉米地的土壤呼吸速率最大,是长白山玉米地土壤呼吸作用的 4.3 倍(图 2b)。

研究表明,陆地生态系统土壤呼吸作用与平均净初级生产力呈显著正相关(Raich & Schlesinger, 1992)。在不考虑水分影响的条件下,全球森林植被的土壤呼吸速率与年均温呈指数关系(刘绍辉和方精云,1997)。分析我国不同地区冬小麦/夏玉米轮

作农田(12 处)的土壤呼吸速率与年平均气温和年平均降水量的关系发现,土壤呼吸速率在区域尺度上的空间分布与各地的年均温和年降水没有显著的相关关系(图 3),表明区域尺度的农田生态系统土壤呼吸作用与自然生态系统土壤呼吸作用不同,这可能与各地农田田间管理方式的多样性和复杂性有关。耕作、施肥、排水灌溉等田间管理可以直接或间接地影响作物生长和环境因子的时空分布,从而影响土壤呼吸作用的空间异质性。即使在同一气候条件、土壤类型和农田管理方式下,由于作物品种不同亦将导致土壤呼吸速率的不同(张宪洲等,2003)。

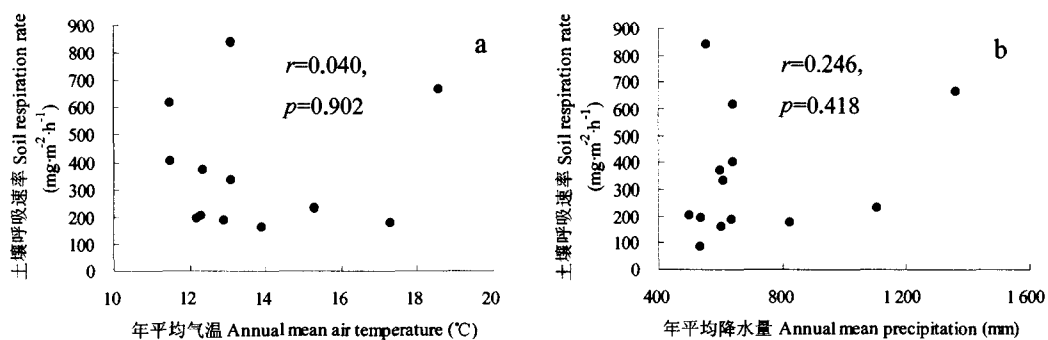


图 3 农田生态系统(冬小麦-夏玉米轮作)土壤呼吸速率与年平均气温(a)和年平均降水量(b)的关系
Fig. 3 Relationships between soil respiration rate and annual mean air temperature and annual mean precipitation in farmland ecosystems (winter wheat and summer maize rotation)

3.2 根际变异性

通常,作物根际土壤呼吸作用也存在空间异质性,这是由于作物根系分布、主要的环境因素和土壤特性等在植株周围的异质性造成的(Xu & Qi, 2001; Epron *et al.*, 2004)。由于作物播种或移栽时具有固定的株距和行距,使得植株空间布局存在着规律性,通常将导致植株根际土壤呼吸作用的空间异质性。要精确估算农田生态系统的碳收支,必须弄清土壤呼吸作用小尺度上的空间变异性(Adachi *et al.*, 2005)。Han 等(2007b)指出,玉米地土壤呼吸作用存在着明显的空间异质性,较高的土壤呼吸速率通常出现在靠近玉米植株的地方。在玉米生长季中,靠近玉米植株的土壤呼吸速率为 $894.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,而行间空地的土壤呼吸速率为 $384.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,这主要是由根系生物量的分布引起,而土壤湿度、土壤有机质、全氮和碳氮比对土壤呼吸作用空间异质性的影响并不显著。

4 根系呼吸作用与土壤异养呼吸作用的区分

根系呼吸作用占总土壤呼吸作用的比例是确定陆地生态系统碳平衡关系和土壤有机碳周转速率的关键参数之一(刘立新等,2004)。为准确估算生态系统碳收支,必须确定根系呼吸作用(自养呼吸作用)和异养呼吸作用占土壤呼吸作用的比例(Larionova *et al.*, 1998)。

目前,用于确定根系呼吸作用和异养呼吸作用占土壤呼吸作用比例的野外观测方法主要有两种:成分综合法和根系生物量外推法。成分综合法就是将土壤呼吸作用分为根系、无根土壤和凋落物等不同组成部分,然后分别测定不同组分释放的 CO_2 量(刘立新等,2004)。在忽略植物生长对土壤有机质分解激发效应的前提下,农田生态系统土壤呼吸作用减去相应空白地的土壤呼吸作用就可得到作物根系呼吸作用(雷宏军等,2005;杨兰芳和蔡祖聪,

2005)。根系生物量外推法就是基于这一原理,通过建立土壤呼吸速率与根系生物量的回归方程,外推到根系生物量为零时的土壤呼吸速率即为微生物呼吸速率,从而得到根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例(韩广轩,2007)。

由于土壤性状、气候条件和作物生长差异,加之测定方法的不同,使得根系呼吸作用占土壤呼吸作

用的比例差异很大。玉米地根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例为 18% ~ 69%,小麦地为 13% ~ 64%,大豆地为 50%,水稻田为 77.2%(表 3)。另外,土壤有机碳含量低、土壤与作物根系的比例相对于大田较小等原因造成盆栽试验测得的根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例偏大(杨兰芳和蔡祖聪,2005)。

表 3 我国农田生态系统作物根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例
Table 3 Contributions of root respiration to soil respiration in farmland ecosystems of China

作物类型 Agrotype	地点 Site	根系呼吸所占比例 Contribution of root respiration		参考文献 Reference	
		范围 Range (%)	均值 Mean (%)		
玉米 <i>Zea mays</i>	辽宁沈阳市 Shenyang, Liaoning Province	氮 150 N150 treatment	36.4	王重阳等, 2006	
		无氮 N0 treatment	28.8		
	辽宁锦州市 ¹ Jinzhou, Liaoning Province		54.5	韩广轩, 2007	
	河北吴桥县 Wuqiao County, Hebei Province		13~23	崔玉亭等, 1997	
	河北深城县 Luancheng County, Hebei Province		1~21	陈素英和胡春胜, 1997	
	江苏南京市 Nanjing, Jiangsu Province		42~94	刘巧辉等, 2005	
	盆栽试验 Pot experiment	高氮 High N-application 低氮 Low N-application	57.9~97.7 58.2~96.5	94.8 93	杨兰芳和蔡祖聪, 2005
冬小麦 <i>Triticum aestivum</i>	河北吴桥县 Wuqiao County, Hebei Province		8~21	崔玉亭等, 1997	
	河北深城县 Luancheng County, Hebei Province		7~32	陈素英和胡春胜, 1997	
	江苏南京市 Nanjing, Jiangsu Province		18.5~76.8	孙文娟等, 2004	
	四川盐亭县 Yanting County, Sichuan Province			50	韩广轩等, 2004
	西藏拉萨市 Lhasa, Tibet		34~44	40	张宪洲等, 2003
				(灌浆期 Filling stage)	
小麦-玉米轮作 <i>Triticum aestivum</i> and <i>Zea mays</i> rotation	黄淮海平原 Huang-huai-hai Valley		36.3~77.6	59.5	雷宏军等, 2005
大豆 <i>Glycine max</i>	江苏南京市 Nanjing, Jiangsu Province		18~78	50	刘巧辉等, 2005
	盆栽试验 Pot experiment		85.2~96.2	92	杨兰芳和蔡祖聪, 2004
水稻 <i>Oryza sativa</i>	江苏南京市 Nanjing, Jiangsu Province		71.2~84.9	77.2	孙文娟等, 2004

¹ 为根系生物量外推法, 其余为成分综合法 1 is root biomass extrapolation method, and the others are component integration method

5 农田生态系统土壤呼吸作用减排和增汇措施

5.1 施肥

不同施肥措施长期实施后,形成的不同肥力土壤具有一致的土壤呼吸速率季节变化趋势,但是它们对土壤呼吸速率和 CO₂ 释放量有明显影响(戴万宏等,2004)。有机肥施入和秸秆还田是农田土壤有机物料输入的主要途径,在稳定农业利用和管理下

进入土壤的有机物越多,形成的有机质也越多,进而促进微生物分解活动(孟磊等,2005);同时,有机肥还可以增加土壤中根系的生物量,从而促进根系呼吸。

土壤呼吸作用的氮肥施用效应较为复杂。研究表明,随着施氮量的增加,土壤呼吸作用也增加(张庆忠等,2005;陈述悦等,2004;王立刚等,2006),杨兰芳和蔡祖聪(2005)指出,氮肥促进土壤呼吸作用的可能原因包括:1)增强植物光合作用,从而提供

给根系呼吸作用和土壤呼吸作用的光合产物增加; 2) 促使根系生长, 使根系呼吸作用增加; 3) 提供微生物有效氮, 增加土壤微生物呼吸作用。但也有研究指出, 氮肥对土壤呼吸作用影响的大小并不显著(孟凡乔等, 2006), 甚至可能抑制土壤呼吸作用(陈述悦等, 2004)。

5.2 秸秆还田

秸秆还田可以调节土壤物理环境, 促进微生物的代谢活动, 有利于土壤养分的转化(强学彩等, 2004); 同时, 秸秆还田还可以提高土壤有机质的数量和质量(雷宏军等, 2005), 增加土壤微生物量, 提高土壤肥力。田间对比试验表明, 随着秸秆还田量的增加, 土壤呼吸速率显著增加, 且在秸秆还田后随着时间的推移增加效应逐渐减小(张庆忠等, 2005; 强学彩等, 2004)。雷宏军等(2005)对黄淮海平原 7 个独立施肥长期定位点 76 个处理的 10~20 年土壤有机碳动态进行了模拟, 发现有机物料还田量是决定耕层土壤 CO₂ 年排放通量大小的直接原因。农作物秸秆的碳含量占其重量的 40%, 秸秆还田可增大碳的矿化作用, 促进土壤碳固定(Martens, 2000)。李长生等(2003)对 1990 年中国土壤温室气体排放的模型模拟表明, 90% 秸秆还田及其气温上升 4℃ 都使土壤呼吸总量增加 4.38%。但是, 从增加农田土壤有机碳的功能看, 50% 和 90% 的秸秆还田可使土壤有机碳增加 4.63 和 10.9 TgC·a⁻¹(李克让, 2002)。

5.3 免耕

各种耕作方式都对土壤造成不同程度的扰动。耕作使得有机质分解条件如土壤透气性和土壤含水量等得到改善, 同时耕作也破坏了土壤的团粒结构, 使稳定的、被吸附的有机质易于分解, 增强土壤有机碳的矿化(孟凡乔等, 2006); 土壤扰动还改变根系生物量, 从而引起土壤呼吸速率加快(孟磊等, 2005; 崔玉亭等, 1997)。

免耕能够明显降低土壤呼吸作用, 增加农田土壤的固碳能力(孟凡乔等, 2006)。免耕少耕使土壤不稳定碳输入增加, 流失减少, 有利于延长碳的平均滞留时间, 意味着土壤汇集碳增加, 而损失到大气中的 CO₂ 减少。同时, 免耕少耕使风雨对土壤的侵蚀作用降低, 起到减少土壤有机质流失的作用(杨景成等, 2003)。经过 16 年田间定位试验研究表明, 长期免耕处理表土层土壤微生物生物量碳、氮含量比常规耕翻处理分别增加了 25.4% 和 45.4%(徐阳春等, 2002)。免耕措施能够明显降低华北平原高产农田生态系统土壤呼吸作用(孟凡乔等, 2006)。但由

于免耕减少了土壤的扰动, 对下层土壤有机碳的补充减少, 可能使有机碳含量反而下降(陈泮勤, 2004)。

6 问题与展望

农田生态系统是人类活动最活跃的部分, 作为受人类活动干扰最为频繁和严重的生态系统, 农田生态系统土壤呼吸作用对陆地生态系统碳循环研究及其温室气体减排具有重要的意义。近 10 年来, 我国科学家已经对农田生态系统土壤呼吸作用开展了大量的观测研究工作, 取得了较大进展, 但是关于我国农田生态系统土壤呼吸作用的控制机理及其过程认识还不统一, 对于农田生态系统土壤呼吸作用的评估仍具有较大的不确定性。导致这一结果的原因可能包括: 1) 农田土壤呼吸作用观测方法的不统一使得各观测研究之间缺乏可比性; 2) 农田土壤呼吸作用的观测研究大多建立在少数观测站点和较短时间尺度(小时、天、季节), 其研究结果难以推广到区域尺度; 3) 土壤呼吸作用研究大多集中在土壤呼吸强度和空间变异性方面, 对土壤呼吸作用的空间异质性研究较少(Fang *et al.*, 1998); 4) 土壤呼吸作用模拟模型大多仅考虑水热因子, 对生物因素、土壤因素以及田间管理等因素考虑较少(Janssens & Pilegaard, 2003; Han *et al.*, 2007a)。

针对我国农田生态系统土壤呼吸作用研究存在的不足, 未来拟加强以下方面的研究: 1) 不同区域典型农田生态系统土壤呼吸作用的比较研究; 2) 农田生态系统土壤呼吸作用的空间异质性及其控制因子研究; 3) 土壤因子和生物因子对土壤呼吸作用综合影响的模拟研究; 4) 农田生态系统土壤呼吸作用的减排增汇对策研究。

参 考 文 献

- Adachi M, Bekku YS, Konuma A, Kadir WR, Okuda T, Koizumi H (2005). Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and two types of plantation in Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 210, 455 - 459.
- Buchmann N (2000). Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 1625 - 1635.
- Chen PQ (陈泮勤) (2004). *Carbon Cycle in Earth System* (地球系统碳循环). Science Press, Beijing, 266 - 268. (in Chinese)
- Chen SY (陈述悦), Li J (李俊), Lu PL (陆佩玲), Wang YH (王迎红), Yu Q (于强) (2004). Soil respiration characteris-

- tics in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 15, 1552 - 1560. (in Chinese with English abstract)
- Chen SY (陈述悦) (2004). *Soil Respiration in the Typical Farmland in the North China Plain* (华北平原典型农田土壤呼吸的研究). Dissertation of Master Degree, Beijing Forestry University, Beijing, 15 - 33. (in Chinese)
- Chen SY (陈素英), Hu CS (胡春胜) (1997). Soil respiration rate of farmland ecosystem in Taihang Piedmont. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (生态农业研究), 5 (2), 42 - 46. (in Chinese with English abstract)
- Cui YT (崔玉亭), Han CR (韩纯儒), Lu JD (卢进登) (1997). Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high yield agroecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 8, 59 - 64. (in Chinese with English abstract)
- Dai WH (戴万宏), Wang YQ (王益权), Huang Y (黄耀), Liu J (刘军), Zhao L (赵磊) (2004). Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (Natural Science Edition) (西北农林科技大学学报(自然科学版)), 32 (12), 1 - 7. (in Chinese with English abstract)
- Editor Group of Comprehensive Regionalization of Agriculture in China («中国综合农业区划»编写组) (1981). *China Agricultural Regional Planning* (中国农业区划), China Agricultural Press, Beijing.
- Epron D, Nouvellon Y, Rouspard O, Mouyondy W, Mabilia A, Saint-André L, Joffre R, Jourdan C, Bonnefond JM, Berbigier P, Hamel O (2004). Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo. *Forest Ecology and Management*, 202, 149 - 160.
- Fang C, Moncrief JB, Gholz HL, Clark KL (1998). Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 205, 135 - 146.
- FAO (2001). Agriculture: Towards 2015/30. Technical Interim Report April 2000. Rome, Food and Agriculture Organization.
- Gough M, Seiler JR (2004). The influence of environmental, soil carbon, root, and stand characteristics on soil CO₂ efflux in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations located on the South Carolina Coastal Plain Christopher. *Forest Ecology and Management*, 191, 353 - 363.
- Granier A, Ceschia E, Damesin C, Dufrene E, Epron D, Gross P, Lebaube S, Le Dantec V, Le Goff N, Lemoine D (2000). The carbon balance of a young Beech forest. *Functional Ecology*, 14, 312 - 325.
- Han GX (韩广轩), Zhu B (朱波), Jiang CS (江长胜) (2006). Soil respiration and its controlling factors in rice fields in the hill region of the Central Sichuan Basin. *Journal of Plant Ecology* (Chinese Version) (植物生态学报), 30, 450 - 456. (in Chinese with English abstract)
- Han GX (韩广轩), Zhu B (朱波), Zhang ZJ (张中杰), Gao MR (高美荣), Jiang CS (江长胜), Zheng XH (郑循华) (2004). CO₂ emission from soil-wheat system in a paddy-dryland rotation area in purple soil and its influence factors. *Ecology and Environment* (生态环境), 13 (2), 182 - 185. (in Chinese with English abstract)
- Han GX (韩广轩) (2007). *Study on Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Simulation in a Maize Field* (玉米农田土壤呼吸作用动态与模拟研究). PhD dissertation, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 78 - 85. (in Chinese)
- Han GX, Zhou GS, Xu ZZ, Yang Y, Liu JL, Shi KQ (2007a). Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem. *Plant and Soil*, 10.1007/s11104-006-9170-8.
- Han GX, Zhou GS, Xu ZZ, Yang Y, Liu JL, Shi KQ (2007 b). Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 39, 418 - 425.
- Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, Andrews JA (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48, 115 - 146.
- Huang B (黄斌), Wang JG (王敬国), Gong YS (龚元石), Karl Stahd, Yang Q (杨倩) (2006). Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 25, 156 - 160. (in Chinese with English abstract)
- Janssens IA, Pilegaard K (2003). Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 9, 911 - 918.
- Jia BR (贾丙瑞), Zhou GS (周广胜), Wang FY (王凤玉), Wang YH (王玉辉) (2005). Soil respiration and its influencing factors at grazing and fenced typical *Leymus chinensis* Steppe, NeiMonggol. *Environmental Science* (环境科学), 26 (6), 1 - 7. (in Chinese with English abstract)
- Jia JS (贾金生), Li J (李俊), Zhang YQ (张永强) (2003). Study on CO₂ emission from soil of typical farmland in North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 11 (3), 1 - 4. (in Chinese with English abstract)
- Kucera C, Kirkham D (1971). Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri. *Ecology*, 52, 912 - 915.
- Larionova AA, Yermolayev AM, Blagodatsky SA (1998). Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use. *Biology and Fertility of Soils*, 27, 251 - 257.
- Lei HJ (雷宏军), Li BG (李保国), Bai YL (白由路), Huang YX (黄元仿), Li KJ (李科江) (2005). Estimation of soil organic matter mineralization in the plough layer and CO₂ emission under different farming practices in China's Huang-Huai-Hai Plain. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 38, 2035 - 2042. (in Chinese with English abstract)
- Li CS (李长生), Xiao XM (肖向明), Froelking S, Moore III B,

- Salas W, Qiu JJ (邱建军), Zhang Y (张宇), Zhuang YH (庄亚辉), Wang XK (王效科), Dai SH (戴昭华), Liu JY (刘纪远), Qin XG (秦小光), Liao BH (廖柏寒), Sass R (2003). Greenhouse gases emission from Chinese farmland. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 23, 493 - 503. (in Chinese with English abstract)
- Li KR (李克让) (2002). *Land Use Change, Net Emission of Greenhouse Gases and Carbon Cycle in Terrestrial Ecosystems* (土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环). China Meteorological Press, Beijing, 296 - 230.
- Li ZF (李兆富), Lü XG (吕宪国), Yang Q (杨青), Gao JQ (高俊琴) (2003). Soil surface CO₂ fluxes of *Deyeuxia angustifolia* wetland in Sanjiang plain. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition) (南京林业大学学报(自然科学版)), 23, 51 - 54. (in Chinese with English abstract)
- Liang W (梁巍), Yue J (岳进), Shi Y (史奕), Huang GH (黄国宏), Liang ZB (梁战备) (2003). Seasonal variation of soil microbial biomass, respiration rate and CH₄ emission in black earth rice fields. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 14, 2278 - 2280. (in Chinese with English abstract)
- Lin ED (林而达) (2001). *Climate Change and the Sustainable Development of Agriculture* (气候变化与农业可持续发展). Beijing Press, Beijing, 1 - 32. (in Chinese)
- Liu LX (刘立新), Dong YS (董云社), Qi YC (齐玉春) (2004). The development on the soil respiration of grassland ecosystem. *Progress in Geography* (地理科学进展), 23 (4), 35 - 42. (in Chinese with English abstract)
- Liu QH (刘巧辉), Huang Y (黄耀), Zheng XH (郑循华) (2005). Determination of upland soil respiration and its components with BaPS system. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 25, 1105 - 1111. (in Chinese with English abstract)
- Liu SH (刘绍辉), Fang JY (方精云) (1997). Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 17, 469 - 476. (in Chinese with English abstract)
- Liu YF (刘允芬) (1998). A tentative study of CO₂ emission from farmland soil in Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 13, 181 - 186. (in Chinese with English abstract)
- Lohila A, Aurela M, Regina K, Laurila T (2003). Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. *Plant and Soil*, 251, 303 - 317.
- Martens DA (2000). Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 361 - 369.
- Meng FQ (孟凡乔), Wu WL (吴文良) (1994). Output of soil organic carbon and its influencing factors in high yield farmland ecosystem. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 4 (Suppl.), 39 - 44. (in Chinese with English abstract)
- Meng FQ (孟凡乔), Guang GH (关桂红), Zhang QZ (张庆忠), Shi YJ (史雅娟), Qu B (屈波), Kuang X (况星) (2006). Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 26, 992 - 999. (in Chinese with English abstract)
- Meng L (孟磊), Ding WX (丁维新), Cai ZC (蔡祖聪), Qin SW (钦绳武) (2005). Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 20, 687 - 692. (in Chinese with English abstract)
- Pangle RE, Seiler JR (2002). Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO₂ efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation on the Virginia Piedmont. *Environment Pollution*, 116, B85 - B96.
- Qi ZY (齐志勇), Wang HY (王宏燕), Wang JL (王江丽), Liu SY (刘书宇) (2003). The development on the research of terrestrial ecosystem soil respiration. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* (农业系统科学与综合研究), 19(3), 116 - 119. (in Chinese with English abstract)
- Qiang XC (强学彩), Yuang HL (袁红莉), Gao WS (高旺盛) (2004). Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 15, 469 - 472. (in Chinese with English abstract)
- Raich JW, Schlesinger WH (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B, 81 - 89.
- Rochette P, Flanagan LB (1997). Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 466 - 474.
- Sánchez ML, Ozores MI, López MJ, Colle R, Torre BD, García MA, Pérez I (2003). Soil CO₂ fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118, 85 - 95.
- Schlesinger WH, Andrews JA (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7 - 20.
- Shi PL, Zhang XZ, Zhong ZM, Ouyang H (2006). Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 220 - 233.
- Sun WJ (孙文娟), Huang Y (黄耀), Chen ST (陈书涛), Yang ZF (杨兆芳), Zheng XH (郑循华) (2004). CO₂ emission from soil-crop system as influenced by crop growth and tissue N content. *Environmental Science* (环境科学), 25 (3), 1 - 6. (in Chinese with English abstract)
- Sun WZ (宋文质), Wang SB (王少彬), Huang WH (黄维翰), Zeng JH (曾江海), Wang ZP (王智平), Zhang YM (张玉铭) (1996). Research on the main greenhouse gases CO₂, CH₄ and N₂O from Chinese farmland soils. *Environmental Science* (环境科学), 17, 85 - 88. (in Chinese with English abstract)

- Wang CY (王重阳), Wang SB (王绍斌), Gu JX (顾江新), Shi Y (史奕), Chen X (陈欣) (2006). Soil respiration in maize fields in the lower reaches of Liaohe Plain. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 25, 1240 – 1244. (in Chinese with English abstract)
- Wang JG (王敬国) (1995). *Soil Chemistry of Plant Nutrition* (植物营养的土壤化学). Beijing Agricultural University Press, Beijing, 39 – 60. (in Chinese)
- Wang LG (王立刚), Qiu JJ (邱建军), Li WJ (李维炯) (2006). Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai Region in China. *Soils and Fertilizers* (土壤肥料), 6, 13 – 17. (in Chinese with English abstract)
- Wang X (王旭), Zhou GS (周广胜), Jiang YL (蒋延玲), Li Feng (李峰) (2006). Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China. *Journal of Plant Ecology* (Chinese Version) (植物生态学报), 30, 887 – 893. (in Chinese with English abstract)
- Wu JG (吴建国), Zhang XQ (张小全), Xu DY (徐德应) (2003). The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain Forest Zone. *Environmental Science* (环境科学), 24 (6), 23 – 32. (in Chinese with English abstract)
- Xu M, Qi Y (2001). Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7, 667 – 677.
- Xu YC (徐阳春), Shen QR (沈其荣), Ran H (冉讳) (2002). Effect of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 39, 89 – 96. (in Chinese with English abstract)
- Yang JC (杨景成), Han XG (韩兴国), Huang JH (黄建辉), Pan QM (潘庆民) (2003). The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 787 – 796. (in Chinese with English abstract)
- Yang LF (杨兰芳), Cai ZC (蔡祖聪) (2004). Diurnal variation of soil respiration in soil-potted with soybean (*Glycine max* L.) at various growth stages and its affecting factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 2955 – 2960. (in Chinese with English abstract)
- Yang LF (杨兰芳), Cai ZC (蔡祖聪) (2005). Soil respiration during maize growth period affected by N application rates. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 42, 9 – 15. (in Chinese with English abstract)
- Yang Q (杨青), Li XG (吕宪国) (1999). A tentative study of dynamic variation of soil respiration in wetland ecosystem in the Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 30, 254 – 256. (in Chinese with English abstract)
- Yu GR (于贵瑞) (2003). *Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem* (全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积). China Meteorological Press, Beijing, 370 – 379. (in Chinese)
- Zhang QZ (张庆忠), Wu WL (吴文良), Wang MX (王明新), Zhou ZR (周中仁), Chen SF (陈淑峰) (2005). The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 2883 – 2887. (in Chinese with English abstract)
- Zhang XZ (张宪洲), Liu YF (刘允芬), Zhong HP (钟华平), Ouyang H (欧阳华) (2003). Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in the Tibetan Plateau. *Resources Science* (资源科学), 25 (5), 103 – 107. (in Chinese with English abstract)
- Zhao SC (赵生才) (2005). The development mechanism and trend of soil carbon pool in Chinese farmland ecosystem. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 20, 587 – 590. (in Chinese)
- Zhou GS (周广胜), Wang YH (王玉辉) (2003). *Global Ecology* (全球生态学). China Meteorological Press, Beijing, 200 – 218. (in Chinese)
- Zhou ZT (周志田), Cheng SK (成升魁), Liu YF (刘允芬), Li JY (李家永) (2002). CO₂ emission of soil under different land-use types in subtropical red soil hilly areas in China: preliminary exploration. *Resources Science* (资源科学), 24 (2), 83 – 87. (in Chinese with English abstract)
- Zhu JX (褚金翔), Zhang XQ (张小全) (2006). Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use/covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 26, 1963 – 1700. (in Chinese with English abstract)
- Zou JW (邹建文), Huang Y (黄耀), Zong LG (宗良纲), Zheng XH (郑循华), Wang YS (王跃思) (2003). A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 23, 758 – 764. (in Chinese with English abstract)