

太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸 CO₂ 排放

刘晓雨, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095)

摘 要:利用长期定位试验研究了太湖地区不同施肥处理下油菜生长期水稻土 CO₂ 排放通量,耕作方式为水稻-油菜轮作,并对 CO₂ 排放通量和土壤(5 cm)温度、土壤水分含量进行了回归模拟。结果表明,不同施肥处理平均土壤呼吸 CO₂ 排放速率在 49.37~85.97 CO₂-C mg·m⁻²·h⁻¹ 之间,与不施肥处理相比,长期施用肥料显著提高了土壤呼吸 CO₂ 排放速率,且在油菜的两个生育期,施肥对土壤呼吸释放 CO₂ 的促进作用,花期期显著高于角果发育成熟期。相关分析表明,土壤呼吸 CO₂ 排放强度与土壤水分、土壤温度有显著的正相关关系。通过计算 Q₁₀,无肥处理(NF)较其他肥料处理(CF、CFM、CFS)对土壤温度有更大的敏感性。

关键词:土壤呼吸;长期施肥;水稻土;土壤温度;土壤水分

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2506-06

CO₂ Emission Under Long-term Different Fertilization During Rape Growth Season of a Paddy Soil from Tailake Region, China

LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract: CO₂ emission was monitored in-situ in a long-term fertilization station located in Tai Lake Region during rape growth season. The paddy soil has been continuously cultivated with rice-rape rotation since 1987. Soil temperature at 5 cm, air temperature and soil water content were also measured simultaneously with soil respiration. The average soil respiration rates among different fertilization treatments were ranged from 49.37~85.97 CO₂-C mg·m⁻²·h⁻¹. Application of fertilizers intensively promoted the emission rates of CO₂ compared with no fertilization treatment. Soil respiration was significantly correlated with soil moisture and soil temperature at 5 cm. No fertilization(NF) treatment plot had relatively higher Q₁₀ value than plots with chemical fertilizers only(CF), chemical fertilizers plus manure(CFM)and chemical fertilizers plus straw(CFS).

Keywords: soil respiration; long-term fertilization; paddy soil; soil temperature; soil moisture

近年来,以全球变暖为主要表现的全球气候急剧变化及不断增加的大气温室气体加剧全球变暖这一事实受到广泛关注与认可,联合国气候变化框架公约将减少温室气体排放、增加碳汇作为缓解气候变化的首要任务^[1],而通过陆地生态系统固碳,实现温室气体减排是应对全球气候变化的重要手段之一。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)有关统计,全球农业减

排的技术潜力高达每年 5 500~6 000 Mt CO₂ 当量^[2],其中 90% 来自减少土壤 CO₂(即土壤固碳)释放,而东南亚农业的潜力居全球首位^[3]。CO₂ 作为最重要的温室气体,对全球变暖的贡献大约占 70%^[4],而土壤呼吸是陆地生态系统土气交换快速而活跃的途径之一,对大气 CO₂ 浓度的变化有显著的影响。全球土壤有机碳库大约为 1 500 Pg^[5-6],每年通过各种途径向大气中释放约 75 Pg C^[7]。但全球土壤 1 500 Pg 有机碳库中,只有农业土壤碳库是受到强烈的人为干扰且在较短的时间尺度上可以调节的碳库^[8],因此全球农业土壤碳库储量及其固碳能力是评估近期温室气体减排潜力的重要依据。

收稿日期:2009-09-15

基金项目:国际合作重大项目(40710019002);国家基金委重点项目(40830528)

作者简介:刘晓雨(1984—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事全球变化与碳循环研究。E-mail:2008103100@njau.edu.cn

通讯作者:潘根兴 E-mail:panggenxing@yahoo.com.cn

我国是世界上平均土壤碳密度较低的国家,全土平均有机碳密度为 $80\sim 105\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2[9-11]}$,远低于世界平均水平(全球全土碳密度平均为 $121\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2[12]}$),尽管存储量不高,但也突显在固碳减排应对气候变化上的巨大潜力。水稻土是我国主要的耕作土壤,其面积为 $45.69\times 10^4\text{ km}^2$,占我国土壤总面积的 4.92% ^[13]。许多研究表明,近 20 年来水稻土具有明显的固碳趋势^[14-17]。因此,对典型稻田生态系统 CO_2 通量在不同时空尺度的交换特征及定量化研究可以为评价全球稻田生态系统对大气 CO_2 的源汇贡献提供十分有价值的技术支持。当前,对水稻土植稻期间 CO_2 的排放已有较多研究,而非植稻期间(旱作油菜)水稻田 CO_2 排放的研究还较少。为此,选择太湖地区一个长期施肥处理的试验田,采用密闭箱采样-气相色谱仪测定法,对水稻土非植稻季节(旱作油菜)土壤呼吸产生的 CO_2 排放进行了连续观测,旨在了解水稻土非植稻季节(旱作油菜)土壤呼吸排放 CO_2 的强度和其随农业施肥管理措施的变化以及影响土壤呼吸与 CO_2 排放的主要因素,完善水稻田全年排放 CO_2 强度的资料,为进一步评估水稻土固碳潜力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

本项研究选择位于江苏省苏州市吴江金家坝镇前厅村($31^\circ 05' \text{N}$, $120^\circ 46' \text{E}$)的始于 1987 年的水稻土长期肥料试验田,种植制度为稻-油轮作。实验于 2008 年 3 月 28 日至 2008 年 6 月 4 日(油菜开花期至收获)进行。该地年降雨量约 $1\ 100\text{ mm}$,冬季地下水位 80 cm ,夏季地下水位 60 cm ,土壤类型是太湖地区典型的潜育型水稻土——黄泥土(铁聚水耕人为土, Ferric-accumulic Stagnic Anthrosols),土壤耕层($0\sim 15\text{ cm}$)原土 pH 为 5.16,粘粒($<2\ \mu\text{m}$)含量为 $302.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,阳离子交换量为 $20.5\text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ 。长期不同施肥处理起自 1987 年,供试的 4 个小区分别是:不施用肥料区(简称无肥区, NF);单施化肥区(简称化肥区, CF);化肥配施秸秆区(简称秸秆区, CFS);化肥配施猪粪区(简称常规区, CFM)。各试验小区的化肥使用量相同,为 $\text{N}\ 427.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $\text{P}_2\text{O}_5\ 45.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $\text{KCl}\ 84.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{KCl}$ 是 $1:0.11:0.20$; 常规区、秸秆区分别增施猪粪 $16\ 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和秸秆 $1\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。小区面积 66.7 m^2 ,每个处理 3 个重复。试验小区的土壤基本性质如表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质($0\sim 15\text{ cm}$)

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil studied($0\sim 15\text{ cm}$)

处理 Treatment	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH (H_2O)
无肥(NF)	1.1	23.78 ± 1.37	1.68 ± 0.14	0.21 ± 0.02	6.02
化肥(CF)	1.18	26.79 ± 2.34	1.85 ± 0.09	0.28 ± 0.03	5.74
常规(CFM)	1.18	28.62 ± 0.10	2.01 ± 0.21	0.26 ± 0.07	5.29
秸秆(CFS)	1.14	29.06 ± 1.57	1.96 ± 0.22	0.23 ± 0.08	5.50

1.2 样品采集与测定方法

1.2.1 野外土壤 CO_2 呼吸排放的样品采集和测定

采用静态密闭箱-气相色谱法^[18]。野外观测与样品采集于 2008 年 3 月 28 至 6 月 4 日进行,其时间为油菜开花及角果发育成熟两个时期。观测期间为晴到多云天气,采样时间为 $8:30\sim 10:30$ ^[19]。采样时,首先将采样箱置于采样底座上(底座内不含杂草和作物),并用水密封,按 0、10、20、30 min 的时间间隔用 60 mL 注射器从采气箱中部的采气孔插入,来回抽动 3 次以便完全混匀气体,抽出 30 mL 。连续采集 4 次,每个小区设 3 个重复。所采集的气体样品采用 Agilent 公司 GC-4890D 气相色谱仪测定,仪器采用 FID 检测器和 Porapak Q 柱。工作条件:柱温 $35\text{ }^\circ\text{C}$,气体流速分别是载气 (N_2) $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, $\text{H}_2\ 45\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 空气 $400\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。采集气体样品的同时测定土温、气温、大气湿度。土温采用 WMS-19 10 路温度检测仪,气温和大气湿度采用 UMIDITY/TEMPHT- 3003 测定。

1.2.2 土壤含水量测定

土壤样品采集于每次监测 CO_2 时进行。每个小区随机采集 3 个点,混匀,立即装到自封袋内。采样深度为 $0\sim 5\text{ cm}$,每个小区采样量约为 200 g 。样品于当天带回实验室,放入冰箱($-4\text{ }^\circ\text{C}$)保存。水分测定采用烘干差额称重法,温度 $105\text{ }^\circ\text{C}$,时间 8 h 。每个样品做 3 个平行。

1.2.3 数据处理

所得数据采用 Microsoft Excel for Windows2003 和 SPSS 13.0 进行处理。

2 结果分析

2.1 施肥管理对土壤呼吸的影响

从开花到角果成熟,油菜处于旺盛生殖生长期。期间不同施肥处理下稻田土壤呼吸 CO_2 排放通量具有明显的动态变化(图 1)。土壤呼吸随油菜生长生育的变化格局与大气温度和土壤(5 cm)温度并不一

致。NF、CF、CFM 和 CFS 处理日均最大呼吸速率分别达到 76.85、119.39、110.15 和 95.22 CO₂-C mg·m⁻²·h⁻¹。单施化肥(CF)、化肥配施猪粪(CFM)和化肥配施秸秆(CFS)较无肥处理(NF)促进了土壤呼吸,增幅分别为 110.0%、102.1%和 79.0%。长期施用有机肥(CFM & CFS)与长期施用化肥(CF)相比虽然提高了土壤有机质含量,但并没有促进土壤呼吸(表 1、表2)。土壤呼吸速率明显分为缓慢上升与相对稳定两个阶段:前一个阶段为花期期,不同施肥处理 CO₂ 的释放速率分异较大;后一个阶段为花角发育成熟期,不同施肥处理间 CO₂ 释放速率差异不显著。

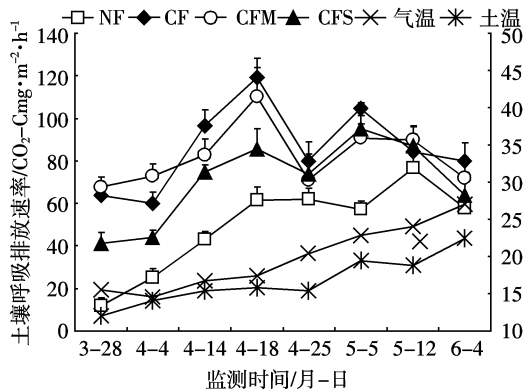


图 1 供试水稻土 CO₂ 呼吸排放、土壤(5 cm)温度和气温的变化动态

Figure 1 Seasonal variation of soil CO₂ flux, soil temperature at 5 cm and air temperature in the paddy soil

表 2 不同生育期水稻土 CO₂ 呼吸排放量比较

Table 2 Comparison of CO₂ emission in different growing stages

处理	花期期	发育成熟期	整个观测期
无肥(NF)	35.38±21.55b	63.36±9.23b	49.37±21.43b
化肥(CF)	84.91±28.30a	87.03±11.73a	85.97±20.09a
常规(CFM)	83.27±18.99a	80.93±10.87ab	82.10±14.38a
秸秆(CFS)	61.28±22.07ab	80.04±13.95ab	70.66±19.82a

注:同列数值间不同字母表明 LSD 多重比较差异显著(P<0.05)。

2.2 温度对土壤呼吸的影响

温度是影响土壤呼吸的重要因素。利用统计软件对土壤呼吸 CO₂ 排放速率与土壤(5 cm)温度进行线性回归分析,结果如表 3。在实验监测的温度范围内,无肥(NF)、化肥配施猪粪(CFM)和化肥配施秸秆(CFS)处理,土壤呼吸 CO₂ 排放速率随土壤温度增加而线性增强;单施化肥处理(CF)土壤呼吸与土壤温度没有线性关系。不同施肥处理土壤呼吸的温度效应 Q₁₀ 为 NF=3.92、CF=1.25、CFM=1.08、CFS=1.27。土壤呼吸对温度的敏感性 NF 最高,CFM 最低。

为进一步揭示土壤呼吸与土壤温度的关系,并尽量减少由于样本容量小而带来的二者关系的不确定性,将所有处理的数据整合在一起,用回归分析的方法对土壤呼吸与土壤温度进行了分析(图 2)。结果表明,土壤呼吸排放 CO₂ 速率与土壤温度具有极显著的二次曲线关系(P=0.004),在本实验监测条件下,土壤呼吸随土壤温度呈现先升高后降低的变化趋势。

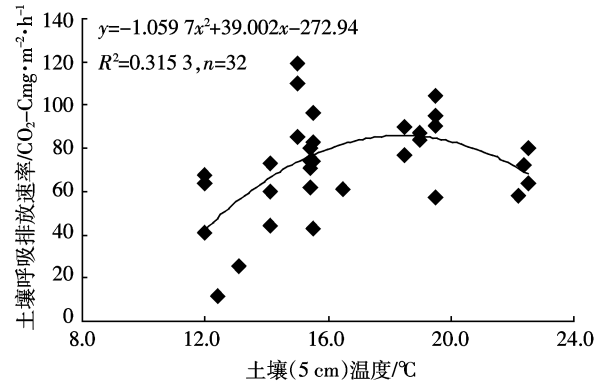


图 2 土壤呼吸排放 CO₂ 速率与土壤(5 cm)温度的关系

Figure 2 Correlations of soil respiration rate with soil temperature(5 cm)

2.3 水分对土壤呼吸的影响

利用统计软件对土壤呼吸 CO₂ 排放速率与土壤(5 cm)水分含量进行线性回归分析,结果如表 3。在实验期土壤水分含量范围内,只有化肥配施秸秆处理(CFS)土壤呼吸 CO₂ 排放速率随土壤水分含量增加而线性增加;而其他 3 个施肥处理,土壤呼吸与土壤水分含量的线性关系并未达到显著水平。将 4 个施肥处理土壤呼吸与土壤水分的数据整合到一起,对土壤呼吸和土壤水分进行回归分析(图 3),我们发现:土壤呼吸排放 CO₂ 的速率与土壤水分含量有极显著的正线性相关关系(P=0.005)。

表 3 不同施肥小区土壤呼吸排放 CO₂ 速率与土壤温度(5 cm)、土壤水分的关系

Table 3 Correlations of soil respiration rate with soil temperature(5 cm) and water content in different fertilization treatments

处理	土壤温度			土壤水分		
	方程	n	R ²	方程	n	R ²
无肥(NF)	y=4.668 5x-28.304	8	0.515*	y=2.867 5x-33.431	8	0.412
化肥(CF)	y=2.354 5x+41.505	7	0.281	y=2.494 1x+11.722	7	0.540
常规(CFM)	y=3.352 6x+26.019	6	0.858*	y=2.422 8x+15.505	7	0.543
秸秆(CFS)	y=6.814 4x-35.923	7	0.726*	y=2.905 0x-10.316	8	0.641*

注:“*”表示显著水平 P<0.05。

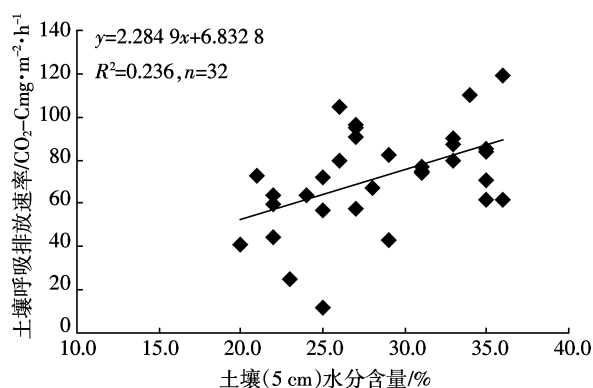
图 3 土壤呼吸排放 CO_2 速率与土壤水分含量的关系

Figure 3 Correlations of soil respiration rate with soil water content

3 讨论

土壤呼吸是一个物理化学及生物学过程, CO_2 的产生与释放受诸多因素的控制, 本实验从田间肥料管理、土壤温度和水分条件对其进行了研究。

郑聚锋等^[19]对同一实验田的研究显示, 在没有作物生长时土壤的基底呼吸速率在 $13.6 \sim 32.7 \text{ CO}_2\text{-C mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间, 平均值为 $19.4 \text{ CO}_2\text{-C mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 而油菜生长期间土壤的呼吸速率在 $11.90 \sim 119.39 \text{ CO}_2\text{-C mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间(图 1), 平均值为 $72.02 \text{ CO}_2\text{-C mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 表明作物生长大大促进了土壤呼吸速率, 增加土壤碳库释放。陆志敏^[20]的室内矿化培养实验和郑聚锋的野外监测实验均表明, 长期单施化肥处理土壤呼吸释放 CO_2 速率显著高于化肥配施有机肥处理, 对照(不施肥处理)土壤呼吸释放 CO_2 的速率是最低的。本实验结果与其不完全一致, 与无肥处理相比, 施用肥料(有机肥或化肥)提高了土壤呼吸释放 CO_2 的速率, 但 3 种施肥处理间土壤呼吸释放 CO_2 速率无显著差异。郑聚锋等的实验是在水稻收割后、油菜种植前进行的, 此时土壤呼吸产生 CO_2 不受作物生长的影响, 且其研究的是土壤呼吸的日变化动态, 历时短(2 d), 影响土壤呼吸的因素较少, 土壤的变异相对小; 本实验在油菜旺盛生长期进行, 监测时间长(2 个月), 且受作物生长的影响, 影响土壤呼吸的因素多而且复杂, 土壤的空间变异相对较大, 这可能是造成实验结果不同的原因。

许多研究已经表明, 施用肥料能够促进土壤的呼吸作用^[21-22], 但是施用化学肥料和施用有机肥料对土壤呼吸的影响还存很多不确定性。乔云发等^[23]对长期不同施肥处理玉米生长期间土壤呼吸结果表明, 化肥配施有机肥较单施化肥提高了土壤呼吸释放 CO_2 的速率, 不施肥较施肥处理降低了土壤呼吸速率, 并认

为施用有机肥提高了土壤有机质水平, 从而促进土壤呼吸释放 CO_2 。Singh^[24]、Enwall^[25]和 Iqbal^[26]得出同样的结果。Iqbal 认为较高的土壤有机质含量促进了壤微生物的生长, 而 Galantini 认为施用有机肥能够提高土壤碳库的生物有效性^[27], 从而提高了土壤呼吸作用。Ding 等对一个玉米-小麦轮作系统进行了土壤呼吸的研究, 发现只在玉米生长季有机肥的施用较单施化肥促进了土壤呼吸, 而在小麦季和休闲期均未检测到两个施肥处理对土壤呼吸的影响有显著差异^[28]。对中国 4 个长期实验点的研究表明, 只在中国东北地区的一个实验点发现化肥与有机肥配施促进了土壤呼吸, 而在中部和南部土壤呼吸对两种施肥处理的影响没有显著差异^[29]。

温度是影响土壤呼吸的重要因素, 不仅影响土壤微生物的代谢过程、土壤酶的活性, 而且对环境中的物理化学特性也有影响。土壤呼吸与温度关系的研究可以概括为以下 3 个方面: 室内矿化培养实验、田间土壤呼吸的日变化和田间土壤呼吸的季节变化。室内矿化培养实验研究土壤中有有机物分解对温度的响应时, 其他因素一般相同, 所以土壤呼吸与温度有很好的相关关系。许多研究表明土壤呼吸的日变化与温度有很好的相关性^[19,30-33], 因为其他重要的环境变量如土壤湿度、生物量和土壤性状在一天内的变化相对较小, 对土壤呼吸的影响不明显。土壤呼吸的季节和年变化对温度的响应是不确定的。Buchmann^[34]与张庆忠等^[35]发现指数方程能最好地描述土壤呼吸和有机表层土壤温度的关系。Alarez^[36]的结果表明土壤原位 CO_2 排放与气温呈指数相关。Dilustro 等发现, 当土壤含水量高于萎蔫系数时, 土壤呼吸与土壤温度有很好的相关性^[37]。Piao 等报道玉米生长季土壤温度高于 18°C 时土壤呼吸与土壤温度没有相关性^[38]。Ding 研究发现小麦生长期土壤呼吸的对数值与土壤温度有很好的正相关关系^[28]。杨兰芳研究了不同施肥处理温度对土壤呼吸的影响, 有作物(玉米)参与时土壤呼吸与温度没有相关性, 而相同施肥处理下裸土土壤呼吸与温度有极显著的相关性, 且其 Q_{10} 是有作物生长时的 2 倍^[39]。可见土壤呼吸的季节和年变化与温度并没有固定的关系, 二者的关系可能随着土壤水分、土壤培肥、作物生长等发生变化。但是, 受土壤微生物和作物生长的控制, 土壤呼吸不会随温度的升高而无限制的升高。我们的试验结果证实了这一点, 即在一定的温度范围内, 土壤呼吸对温度的影响可能会有先升高后降低的趋势。

土壤水分也是影响土壤呼吸的重要因素,它通过控制土壤养分对土壤生物和作物的有效性而影响土壤呼吸,同时水分是作物生长与土壤生物生存不可或缺的条件。Richard 等认为土壤水分可能会限制土壤呼吸对温度的响应^[40]。Lawrence 等也发现土壤水分含量影响土壤呼吸的温度敏感性^[41]。Jia 发现土壤呼吸随着土壤水分有效性的降低而呈现降低的趋势,达到土壤萎蔫系数时,这一降低趋势停止^[42]。我们通过对土壤呼吸与土壤温度的研究发现,土壤呼吸随土壤水分显著的增加而线性增加,这与 Xu^[43]对草地生态系统的结果是一致的。

4 结论

农田土壤呼吸的季节变化受到如施肥管理、温度、土壤水分和作物生长多种因素的影响和控制。稻油轮作系统中油菜旺盛生长期,作物的生长显著增加了土壤呼吸。与不施肥相比,长期施用化学或有机肥料促进了土壤呼吸作用,不同施肥处理对土壤呼吸速率分别增加了(CF)110.0%、(CFM)102.1%和(CFS)79.0%。受长期施肥的影响,不同小区土壤呼吸对温度的敏感性(Q_{10})不同,NF 最高,为 3.92;CFM 最低,为 1.08;CF 与 CFS 分别为 1.25、1.27。土壤呼吸 CO₂ 排放速率随土壤温度呈现先升高后降低的趋势,其关系可以用二次曲线很好地模拟。在一定的土壤水分含量范围内,土壤呼吸随土壤水分显著的增加而线性增加。

参考文献:

- [1] UNFCCC, Fact Sheet. The need for mitigation. <http://unfccc.int/press/items/2794.php>. 2008.
- [2] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2007, 118: 6–28.
- [3] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2008, 363: 789–813.
- [4] Houghton J. Global warming[M]. Dai Xiaosu, Shi Guangyu, Dong Min, et al. translate. Beijing: Meteorological Publishing House, 1998: 29–51.
- [5] Lal R. World soils and greenhouse effect[J]. *IGBP Global Change Newsletter*, 1999, 37: 4–5.
- [6] 彭少麟, 李越林, 任海. 全球变化条件下的土壤呼吸效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 705–713.
PENG Shao-lin, LI Yue-hai, REN Hai. Progress in research on soil respiration under the global change[J]. *Advance in Earth Science*, 2002, 17(5): 705–713.
- [7] Schlesinger W H, Andrews J W. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7–20.
- [8] Food & Agriculture Organization (FAO). Soil carbon sequestration for improved Land Management[R]. *World Soil Resources Reports*, No. 96, ISSN 0532–0488. Rome, Italy: FAO, 2001.
- [9] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 522–528.
JIN Feng, YANG Hao, CAI Zu-cong, et al. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 522–528.
- [10] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17: 1048–1058.
- [11] Zhou T, Shi P, Wang S. Impacts of climate change and human activities on soil carbon storage in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58: 727–734.
- [12] Batjes N H. Carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151–163.
- [13] 刘庆花, 史学正, 于东升, 等. 中国水稻土有机和无机碳的空间分布特征[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 659–664.
LIU Qing-hua, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng, et al. Spatial distribution characteristics of paddy soil organic and inorganic carbon in China[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 659–664.
- [14] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of top soil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79–92.
- [15] Liu Q H, Shi X Z, Weindorf D C. Soil organic sequestration potential of top soils in China using the 1:1, 000, 000 soil database and their implications for C sequestration[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB3024, doi: 10. 1029/2006GB002731.
- [16] Xie Z B, Zhu J P, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1989–2007.
- [17] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 等. 近 20 年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素[J]. 第四纪研究, 2004, 24(2): 236–242.
ZHANG Qi, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Dynamics of top soil organic carbon of paddy soils at Yixing over the last 20 years and the driving factors[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 236–242.
- [18] Raich J W, Bowden R D, Steudler P A. Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soils[J]. *Soil Sci of Soc of Am J*, 1990, 54: 1754–1757.
- [19] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO₂ 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 485–494.
ZHENG Ju-feng, ZHANG Xu-hui, PAN Gen-xing, et al. Diurnal variation of soil basal respiration and CO₂ emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilizations[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 485–494.
- [20] 陆志敏, 潘根兴, 郑聚锋, 等. 不同状态样品培养下太湖地区黄泥土好气呼吸与 CO₂ 产生潜力[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 987–993.
LU Zhi-min, PAN Gen-xing, ZHENG Ju-feng, et al. Change in CO₂ production potential by soil respiration from a paddy soil under aerobic

- incubation by using differently disturbed samples[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):987-993.
- [21] XIAO Yu, XIE Gao-di, LU Chun-xia, et al. The value of gas exchange as a service by rice paddies in suburban Shanghai, PR China[J]. *Agricultural, Ecosystems & Environment*, 2005, 109:273-283.
- [22] ZHANG Ju-feng, ZHANG Xu-hui, LI Lian-qing, et al. Effect of long-term fertilization on C mineralization and production of CH₄ and CO₂ under anaerobic incubation from bulk samples and particle size fractions of a typical paddy soil[J]. *Agricultural, Ecosystems & Environment*, 2007, 120:129-138.
- [23] 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.
- QIAO Yun-fa, MIAO Shu-jie, WANG Shu-qi, et al. Soil respiration affected by fertilization in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6):1028-1035.
- [24] Singh K P, Ghoshal Nandita, Singh Sonu. Soil carbon dioxide flux, carbon sequestration and crop productivity in a tropical dryland agroecosystem: Influence of organic inputs of varying resource quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42:243-253.
- [25] Enwall Karin, Nyberg Karin, Bertilsson Stefan, et al. Long-term impact of fertilization on activity and composition of bacterial communities and metabolic guilds in agricultural soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39:106-115.
- [26] Iqbal Javed, HU Rong-gui, LIN Shan, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131:292-302.
- [27] Galantini J, Rosell R. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean Soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87(1):72-79.
- [28] Ding Wei-xin, Meng Lei, Yin Yunfeng. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39:669-679.
- [29] Ge G F, Li Z J, Zhang J, et al. Geographical and climatic differences in long-term effect of organic and inorganic amendments on soil enzymatic activities and respiration in field experimental stations of China[J]. *Ecological Complexity*, 2009, in press.
- [30] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, 27(10):1608-1705.
- HAN Guang-xuan, ZHOU Guang-sheng, XU Zhen-zhu. Temporal variation of soil respiration and its affecting factors in a maize field during maize growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10):1698-1705.
- [31] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 土壤肥料, 2006(6):13-17.
- WANG Li-gang, QIU Jian-jun, LI Wei-jiong. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer corn in Huanghuaihai Region in China[J]. *Soils and Fertilizers*, 2002(6):13-17.
- [32] 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[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3):450-456.
- HAN Guang-xuan, ZHU Bo, JIANG Chang-sheng. Soil respiration and its controlling factors in rice fields in the hill region of the central Sichuan basin[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3):450-456.
- [33] 秦小光, 蔡炳贵, 吴金水, 等. 北京灵山草地土壤 CO₂ 源汇和排放通量与温度湿度昼夜变化的关系[J]. 生态环境, 2004, 13(4):470-475.
- QIN Xiao-guang, CAI Bing-gui, WU Jin-shui, et al. The diurnal variations of soil CO₂ source sink and flux in grassland of Lingshan Mts., Beijing and their relationships with temperature and soil moisture[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4):470-475.
- [34] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies stands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:1625-1635.
- [35] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11):2883-2887.
- ZHANG Qing-zhong, WU Wen-liang, WANG Ming-xin, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11):2883-2887.
- [36] Alvarez R, Alvarez C R. Temperature regulation of soil carbon dioxide production in the Humid Pampa of Argentina: Estimation of carbon fluxes under climate change[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34:282-285.
- [37] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ flux components in southeastern mixed pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 204:85-95.
- [38] Piao H C, Wu Y Y, Tong Y T, et al. Soil-released carbon dioxide from microbial biomass carbon in the cultivated soils of karst areas of southwest China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31:422-426.
- [39] 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.
- YANG Lan-fang, CAI Zu-cong. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):9-15.
- [40] Richard T C, Peter D B, Carole C K, et al. Controls on soil respiration in semiarid soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36:945-951.
- [41] Lawrence B F, Bruce G J. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130:237-253.
- [42] Jia Bingrui, Zhou Guangsheng. Integrated diurnal soil respiration model during growing season of a typical temperate steppe: Effects of temperature, soil water content and biomass production[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41:681-686.
- [43] Xu Wenhua, Wan Shiqiang. Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40:679-687.