

土壤温度和湿度对冬小麦田土壤空气 CO₂浓度的影响*

刁一伟^{1,2)} 郑循华²⁾ 王跃思²⁾ 徐仲均²⁾
宋涛^{1,2)} 郎红东^{1,2)} 朱建国³⁾

1) (南京气象学院, 南京 210044)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

3) (中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 通过同步观测耕层土壤空气 CO₂ 浓度廓线、土壤温度和土壤含水量, 主要研究和讨论了华东地区典型稻麦轮作农田旱地阶段的土壤空气 CO₂ 浓度的变化规律, 及土壤温度和含水量对它的影响。结果表明: 麦田土壤空气 CO₂ 浓度与植物生长密切相关。土壤空气 CO₂ 浓度受土壤温度的影响较为显著, 且深层的相关性要明显大于浅层。观测阶段的麦田土壤含水量介于 30% 和 44% 之间, 与土壤空气 CO₂ 浓度有较好的相关性 (相关性 $R^2 = 0.61$, 统计显著性 $p < 0.001$)。土壤空气 CO₂ 浓度与土壤含水量呈正相关性的原因可能是: 高土壤含水量导致的低充气孔隙度降低了土壤空气 CO₂ 扩散速率, 从而导致土壤空气 CO₂ 聚积, 浓度升高。在 0~30 cm 土层中, 上层土壤气体中的 CO₂ 向上垂直扩散要比下层土壤快。土壤温度对土壤空气 CO₂ 浓度的影响大于土壤含水量。

关键词: CO₂ 浓度; 土壤空气; 土壤温度; 土壤含水量

文章编号 1006-9585 (2004) 04-0584-07 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

1 引言

从 1850 年以来, 大气中的温室气体浓度持续增长, 其中最主要的温室气体 CO₂ 增长了 34%, 2000 年达到 $368 \mu\text{mol mol}^{-1}$, 目前的增长速率为每年 0.4%^[1]。大气 CO₂ 浓度的动态变化过程受大气、海洋和陆地生态系统的气体交换过程 (包括人为活动排放过程) 控制, 其中陆地生态系统在这之中起的作用是当前全球关注的热点^[2]。全球土壤碳释放量估计在 $50 \sim 75 \text{ Gt a}^{-1} (\text{C})$ ($1 \text{ Gt} = 1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$) 之间^[3]。科学家们认为土壤含有大于陆地植物碳库两倍的碳储量, 是全球碳循环的第二大碳库^[4]。因此, 定性、定量地分析土壤表面和土壤剖面上的温室气体传输和转化过程是研究陆地生态系统 CO₂ 循环的关键, 研究的主要问题包括土壤空气 CO₂ 浓度、土壤呼吸和土壤-大气界面 CO₂ 交换通量。土壤空气 CO₂ 浓度和土壤呼吸关系密切, 同时直接影响到土壤-大气界面的 CO₂ 交换通量^[5], 所以, 很有必要研究土壤空气 CO₂ 浓度变化和浓度廓线的规律性及其控制因素和作用机制。

2003-06-11 收到, 2004-10-08 收到再改稿

* 国家自然科学基金资助项目 40175030 以及中国科学院创新工程项目 KZCX2-408 和 KZCX1-SW-01 共同资助

研究表明,人们很难定量地描述根系呼吸在农田土壤层总体呼吸中所占的比例,因此,科学家们认为需要对土壤空气 CO₂ 浓度进行仔细研究。早在 20 世纪 70 年代,Edwards 和 Sollins^[6]就提出逐层测量 CO₂ 浓度的方法,依次为表层土壤、无根系土壤层到底层土壤,同时监测分布于各层土壤中的根系摄取氧气的情况。由于测量方法的多样性,在估算土壤空气 CO₂ 浓度过程中,许多变量都带有自身的局限性。许多估算方法在计算根系呼吸的同时带进了土壤扰动的作用^[7]。尽管目前还存在着上述这些困难,但土壤 CO₂ 浓度数据对于比较不同土壤的生物活性和推算生态系统类型的诊断参数还是相当有用的。微生物呼吸、根系呼吸、和凋落物降解都对土壤空气 CO₂ 浓度产生着不同程度的影响,而且这些生态过程也可能同时受多个因素的影响,进而影响土壤储存碳向大气的释放。

当前对于土壤空气 CO₂ 浓度的研究主要集中在森林和草原生态系统,而对农田生态系统土壤空气 CO₂ 浓度的研究却很少。本文通过田间观测,研究华东稻麦轮作农田小麦生长季的土壤 CO₂ 浓度变化规律及土壤温度和土壤湿度对其的影响。

2 研究方法

2.1 研究地区概况与田间实验处理

实验地点选在江苏省无锡市锡山区安镇年余村农场内 (31°37'N, 120°28'E), 实验田为太湖地区典型水稻土上的稻麦轮作农田。土壤为黄泥土,耕作层厚度 13.0±1.6 cm,容重 1.2±0.1 g cm⁻³,总空隙度 54%±2%,粘粒 (<0.005 mm) 含量 37%,有机质含量 25.8±0.4 g kg⁻¹,全 N 含量 1.59±0.25 g kg⁻¹,全 P 含量 (以 P₂O₅ 计) 1.23±0.32 g kg⁻¹,pH (水) 值为 6.8。6 月中旬至 10 月中下旬为水稻生长季,11 月至次年 5 月底或 6 月初为冬小麦生长季,两茬作物之间,旱田裸露闲置。实验分别在常规麦田和裸地各设 3 个重复观测区。裸地观测区均设在常规麦田中,面积大小 2 m×2 m,不种植作物,并随时清除杂草,其他处理与常规观测区完全相同。裸地观测区周围是与常规观测区处理完全相同的麦田。冬小麦 (品种: *Triticum aestivum* L. cv. Ningmai-9) 于 2001 年 11 月 15 日播种,2002 年 6 月 2 日收割。小麦生长季 N 肥使用量为 250 kg hm⁻² (以纯 N 计,下同),其中 11 月 13 日施复合肥 50 kg hm⁻²,尿素 50 kg hm⁻²; 12 月 4 日施尿素 50 kg hm⁻²; 3 月 3 日施复合肥 25 kg hm⁻²,尿素 25 kg hm⁻² a⁻¹; 4 月 5 日施尿素 50 kg hm⁻²。田间管理按当地常规方式进行。裸地对照的田间施肥等处理与常规麦田处理相同。观测期从 2001 年 12 月 15 日到 2002 年 3 月 28 日。

2.2 样品采集与分析

观测土壤空气 CO₂ 浓度廓线的采样器由集气管、导气管和密封塞 3 部分组成,分别埋设在重复观测区^[8]。每个重复观测区在 0~30 cm 土壤剖面中埋设 10 个采样器,采样器间隔深度 3 cm。观测在每周的一、四上午进行。刁一伟等^[8]对具体采样和分析方法进行了详细描述。

在对土壤空气 CO₂ 浓度廓线进行观测的同时,还同步地观测 5 cm 深度的土壤体积含水量和土壤温度。用土壤含水量原位测定计 (TDR) 观测含水量,并用环刀法对 TDR 测定结果进行标定,标定曲线确定为 $m = 0.6796m_{\text{TDR}} + 19.594$ (相关性 $R^2 =$

0.82, 统计显著性 $p < 0.001$, 标定误差 $s = 2.2\%$), 其中, m 为土壤实际体积百分比含水量, m_{TDR} 为 TDR 测定的土壤体积百分比含水量。土壤温度数据来自中国科学院南京土壤研究所。使用热敏电阻和热电偶探测器全天候测量土壤 1、5、10 和 20 cm 的温度, 每 10 min 一组数据。空白区的土壤温度数据, 在本实验中由热敏电阻和热电偶探测器同步测量, 测量深度为 5 cm。土壤湿度也被同步测量, 这是由于其对土壤里的生物和非生物过程的多重影响。由于 2002 年 2 月 9 日~3 月 1 日以及 2002 年 3 月 13 日~21 日的土壤温度数据缺测, 因此我们使用已得到的有效土壤温度资料与气温资料 (气温资料由中国科学院南京土壤研究所提供) 进行拟合 ($y = -0.0102x^2 + 0.7355x + 5.6015$, 其 $R^2 = 0.33$, x 为气温, y 为土壤温度), 然后再用气温数据反推得到土壤温度的缺测资料。

3 结果与讨论

3.1 土壤空气 CO₂ 浓度的时间变化

对土壤空气 CO₂ 浓度的观测结果表明, 在整个观测期内, 土壤空气 CO₂ 浓度总体上随小麦生长季而呈上升趋势 (如图 1), 两种田间处理的土壤空气 CO₂ 浓度为常规麦

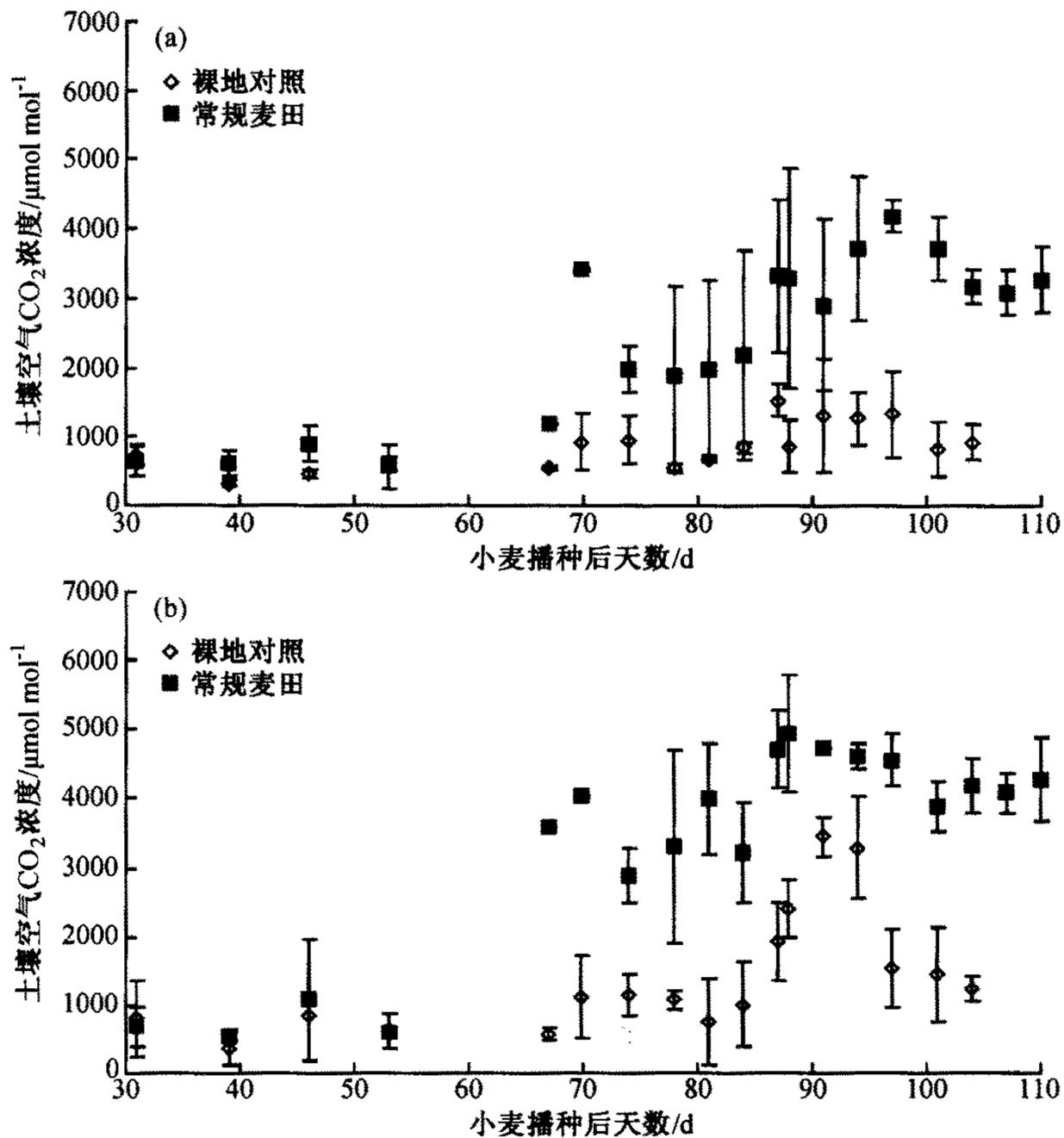


图 1 土壤空气 CO₂ 浓度的季节变化 (垂直线段为标准误差)

(a) 3 cm 土壤深度; (b) 30 cm 土壤深度

田 > 裸地对照 (t 检验, $p < 0.001$)。

裸地对照处理的土壤空气 CO₂ 浓度变化比较平缓, 主要受气候环境因素影响; 常规麦田的土壤空气 CO₂ 浓度由于受植物根系呼吸的影响, 变化比较明显。在小麦播种后 68 天以内 (越冬前和越冬期间, 即小麦苗期), 田间植物生长相对较弱, 根系活性和土壤微生物活性都较差, 此阶段的土壤空气 CO₂ 浓度维持在 2 500 ~ 3 500 $\mu\text{mol mol}^{-1}$; 而在小麦生长相对旺盛期 (小麦春季返青直至成熟期之前), 土壤空气 CO₂ 浓度达到 4 000 ~ 6 000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 大约是小麦苗期的 2 倍 (t 检验, $p < 0.001$)。可见, 农田生态系统土壤空气 CO₂ 浓度与植物生长关系密切。

以 0 ~ 15 cm 深度为例, 在整个观测期内, 土壤空气 CO₂ 浓度的变化范围如下: 裸地对照区为 372.94 ~ 2467.97 $\mu\text{mol mol}^{-1}$; 常规麦田为 598.02 ~ 4488.67 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 。常规麦田的观测结果比德国草地的观测结果 2 000 ~ 2 500 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ [9] 高, 但低于美国 Kansas 草原土壤的观测结果[10]。

3.2 土壤温度对土壤空气 CO₂ 浓度的影响

对观测期内数据的分析结果表明: 土壤空气中 CO₂ 浓度和土壤温度的季节变化格局基本一致 (如图 2), 温度显著影响土壤空气 CO₂ 浓度 (如图 3 和表 1)。其原因是温度显著影响土壤微生物活性。一般地, 冬季和初春土壤温度较低, 限制了微生物活性, 土壤呼吸弱, 土壤空气 CO₂ 浓度处于低值; 春末夏初, 随着土壤温度升高, 可能使分解土壤中有机质的微生物活性增强, 从而导致土壤空气 CO₂ 浓度也持续升高。

表 1 裸地土壤空气 CO₂ 浓度与土壤温度的相关性

土壤深度/cm	相关性 (R^2)	统计显著性 (p)
3	0.61	< 0.05
6	0.64	< 0.001
9	0.72	< 0.001
21	0.77	< 0.001

注: 土壤深度为 21 cm, 温度为 20 cm 深度的观测值; 由于深度相差 1 cm 左右的不同土层温度差异不明显, 这里近似地将以上各土层深度的温度观测值认为是土壤 21 cm 温度。同理, 土壤深度为 3 cm, 温度为 1 cm 深度的观测值; 土壤深度为 6 cm, 温度为 5 cm 深度的观测值; 土壤深度为 9 cm, 温度为 10 cm 深度的观测值。 R^2 为三次多项式拟合结果。

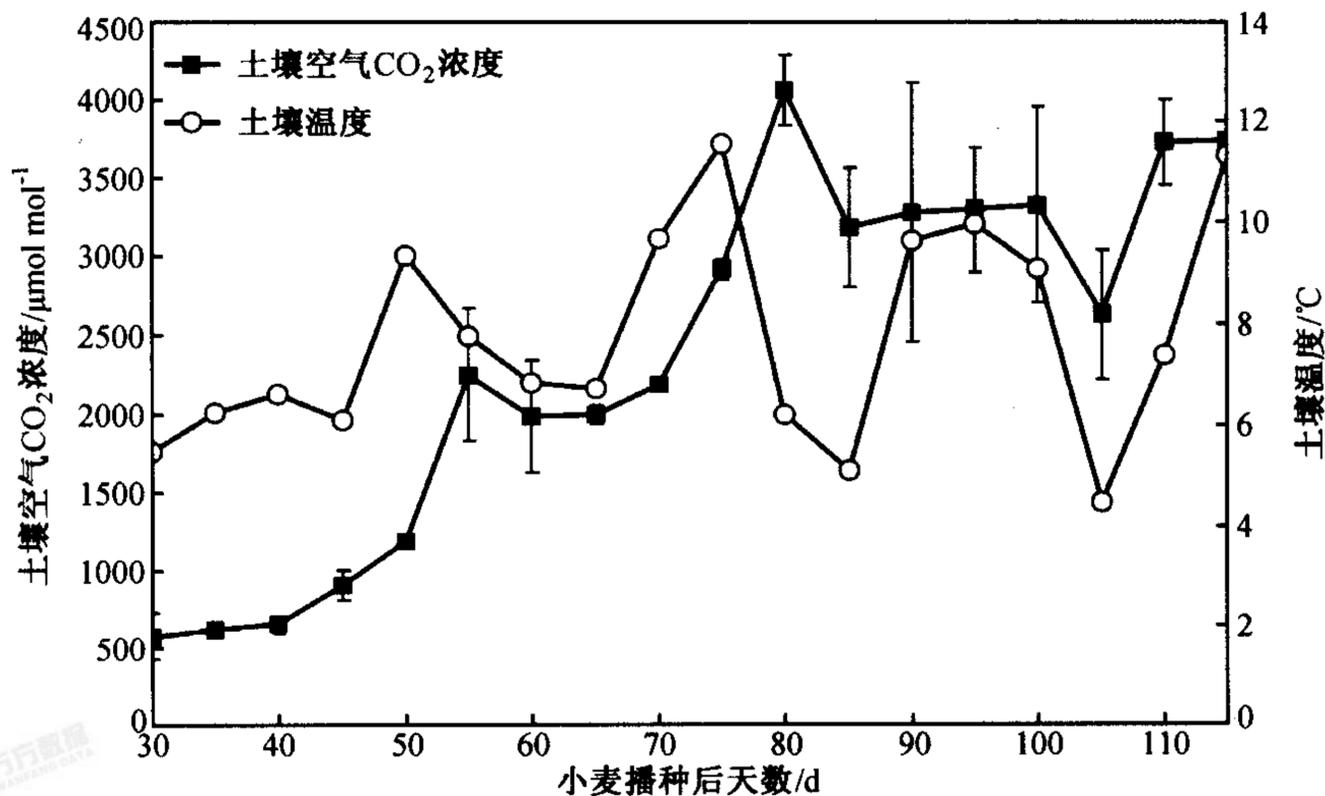


图 2 裸地土壤空气 CO₂ 浓度及同一深度土壤温度的季节变化

土壤深度为 21 cm, 温度为 20 cm 深度的观测值, 由于深度相差 1 cm 左右的不同土层温度差异不明显, 这里近似地将其认为是土壤 21 cm 温度。误差线表示在 3 个不同剖面上同一深度 CO₂ 浓度观测值的标准偏差

虽然土壤空气 CO_2 浓度与土壤温度的季节变化基本一致,但是,图 2 显示的裸地土壤 21 cm 深度的空气 CO_2 浓度和该层土壤温度的变化趋势表明,土壤空气 CO_2 浓度变化一般滞后于土壤温度变化。小麦播种后 31~67 天,土壤温度平均 $<6\text{ }^\circ\text{C}$,土壤各层生物活性较低,土壤 CO_2 浓度处于较低水平(约 $1\ 000\ \mu\text{mol mol}^{-1}$)。之后,土壤 CO_2 浓度随着温度的升高而逐渐升高,在 87 天左右达到最高值。土壤 CO_2 浓度变化对土壤温度变化的滞后响应,可能是微生物生长变化对土壤温度变化的响应滞后所致。

表 1 说明,土壤空气 CO_2 浓度受土壤温度的影响较为显著(三次多项式拟合结果)。从各层的土壤温度与土壤空气 CO_2 浓度的相关性来看,深层的相关性比浅层更强,这一结果与戴万宏^[11]的研究结果相一致。

实验观测期内,土壤含水量波动不大,保持在 30%~44% (V/V) 之间。从图 3 可以看出:(1) 当土壤温度为 5~6 $^\circ\text{C}$ 时(初春),土壤空气 CO_2 浓度处于最低水平,这很可能是土壤微生物呼吸受到低温限制的结果。(2) 当土壤温度在 10 $^\circ\text{C}$ 左右时,土壤空气 CO_2 浓度出现最高值。这说明,对于稻麦轮作农田的旱地阶段,在春季,10 $^\circ\text{C}$ 左右的土壤温度对 20 cm 土层的微生物活性和呼吸作用最为有利,从而导致了最高的 CO_2 浓度。关于这一问题,Sotomayor 和 Rice 等^[10]曾提出草地土壤空气 CO_2 浓度出现高值的最佳温度是在 23 $^\circ\text{C}$ 左右。但是,由于观测数据有限,我们目前尚不能确定小麦在整个生长季中土壤空气 CO_2 浓度出现高值的温度范围,有待进一步研究。

综上所述,土壤温度影响土壤空气 CO_2 浓度的机制可以从以下两方面进行解释:(1) 直接作用:土壤温度强烈影响微生物活性,进而影响微生物呼吸释放到土壤空气中的 CO_2 ;(2) 间接作用:对于裸地处理而言,由于距离常规处理麦田距离太近(大约 1 m),麦田土壤中受根系影响的 CO_2 水平扩散也可能影响到裸地处理区土层的 CO_2 浓度。

3.3 土壤含水量对土壤空气 CO_2 浓度的影响

如图 4 所示,2002 年 2 月 14 日到 2002 年 5 月 13 日,实验地麦地土壤含水量介于 30%和 44%之间,土壤空气 CO_2 浓度与含水量有较好的相关性($R^2=0.61$, $p<0.001$),其原因可能是:(1) 实验区春夏季节的降水充足,土壤处于湿润期,这可以促进土壤呼吸,使土壤空气 CO_2 浓度出现高峰值。(2) 高土壤含水量和低充气孔隙度降低了土壤空气 CO_2 扩散率,从而导致土壤空气 CO_2 聚积,浓度升高;反之,则增大土壤空气扩散速率,降低土壤空气 CO_2 浓度。

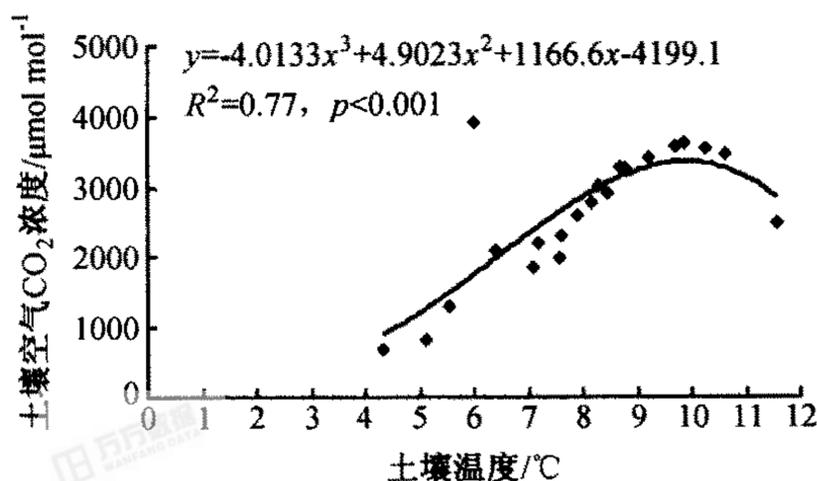


图 3 裸地土壤空气 CO_2 浓度与温度的关系
(土壤深度 21 cm)

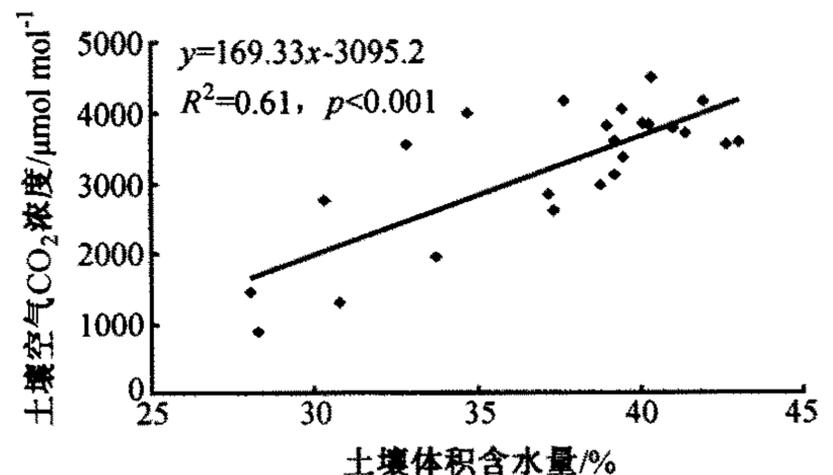


图 4 裸地土壤空气 CO_2 浓度与土壤含水量的关系
(土壤深度 6 cm)

虽然土壤含水量强烈影响土壤微生物活性和植物生长过程, 但与土壤温度相比, 在田间复杂条件下, 土壤含水量对土壤空气 CO₂ 浓度的影响处于次要地位, 表 1、图 3 和图 4 中的 R^2 值的差异可以说明这一点, 而且与相关研究的结论^[12,13]也基本一致。

4 结论

在常规农田管理条件下, 华东稻麦轮作农田小麦生长季的土壤空气 CO₂ 浓度与小麦生长密切相关。两种田间处理的土壤空气 CO₂ 浓度为: 常规麦田 > 裸地对照。土壤空气 CO₂ 浓度与土壤温度具有显著的相关性, 而且深层的相关性强于浅层。麦田土壤空气 CO₂ 浓度与土壤含水量呈线性正相关性。

致谢 陈万隆、韩圣慧、周再兴、张文、刘广仁、刘春岩、刘刚、韩勇等人为本研究提供了重要支持, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/, 2001.
- 2 王明星、张仁健、郑循华, 温室气体的源与汇, 气候与环境研究, 2000, 5 (1), 75~79.
- 3 Raich, J. W., and W. H. Schlesinger. The global carbon dioxide efflux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, *Tellus*, 1992, 44B, 81~90.
- 4 Rayment, M. B., and P. G. Jarvis., Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest, *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32, 35~45.
- 5 Trumbore, S. E., Age of soil organic matter and soil respiration: Radiocarbon constraints on belowground C dynamics in a *Pinus sylvestris* L. forest, *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 31, 757~767.
- 6 Edwards, N. T., and P. Sollins, Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components, *Ecology*, 1973, 54, 406~412.
- 7 Andrews, J. A., K. G. Harrison, R. Matamala, and W. Schlesinger., Separation of root respiration from total soil respiration using carbon-13 labeling during free carbon dioxide enrichment (FACE), *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63, 1429~1435.
- 8 刁一伟、郑循华、王跃思等, 开放式空气 CO₂ 浓度增高条件下的旱地土壤气体 CO₂ 浓度廓线测定, 应用生态学报, 2002, 13 (10), 1249~1252.
- 9 Kammann, C., L. Grunhage, and H. J. Jager, A new sampling technique to monitor concentration of CH₄, N₂O and CO₂ in air at well-defined depths in soils with varied water potential, *Journal of Soil Science*, 2001, 52, 297~303.
- 10 Sotomayor D., and C. W. Rice, Soil air carbon dioxide and nitrous oxide concentration in profile under tallgrass prairie and cultivation, *J. Environ. Qual.*, 1999, 28, 784~793.
- 11 戴万宏, 农田土壤空气 CO₂ 动态和土壤-大气界面 CO₂ 释放研究, 西北农业大学博士学位论文, 2002.
- 12 Mallik, A. U., and D. Hu, Soil respiration following site preparation treatments in forest floors, *Forest Ecology and Management*, 1997, 97, 265~275.
- 13 Meir P., J. Grace, J. Lloyd, and A. C. Miranada, Soil respiration in a rain forest in Amazonian, and in cerrado in Central Brazil, *Amazonian Deforestation and Climate*, J. H. C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts, and R. L. Victoria, Eds., Jone Wiley and Sons, UK, 1996.

Effects of Soil Temperature and Moisture on Soil CO₂ Concentration of Wheat Fields

Diao Yiwei^{1,2)}, Zheng Xunhua²⁾, Wang Yuesi²⁾, Xu Zhongjun²⁾,
Song Tao^{1,2)}, Lang Hongdong^{1,2)}, and Zhu Jianguo³⁾

1) (*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

2) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

3) (*Nanjing Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Abstract Changes in non-waterlogged soil air carbon dioxide (CO₂) concentration were studied in a rice-wheat rotation ecosystem of southeast China. Based on the synchronous measurement of CO₂ concentration in soil profiles and soil temperature and moisture. By analyzing the experimental data in detail, some results could be outlined as follows: The relationship between soil air CO₂ concentration and soil temperature showed remarkably correlation, and it changed with the wheat upgrowth. When water content was between 30% and 44%, it was positive correlative with the CO₂ concentration in soil profiles ($R^2=0.61$, $p<0.001$). Soil CO₂ concentration of Wuxi wheat land and soil water content were presenting close correlation. The reason can be explained: High soil water content and low porosity had reduced diffusivity of soil air CO₂, thus causing soil air CO₂ to be accumulated, and the concentrations rises. Within 0~30 cm in soil depth, CO₂ in the pores of the upper soil layers vertically diffused upwards much more quickly than that in the lower soil layers; soil temperature and concentrations represented remarkably correlation, and the effect of soil water content on soil air CO₂ took second place.

Key words: CO₂ concentration; soil air; soil temperature; soil moisture .