

设施菜田土壤呼吸速率日变化特征分析*

任涛^{1,2} 李俊良³ 张宏威³ 陈清^{1**} 王敬国¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 华中农业大学资源与环境学院 武汉 430070;
3. 青岛农业大学资源与环境学院 青岛 266109)

摘要 研究设施菜田土壤呼吸速率日变化特征对于了解CO₂排放对环境和作物生长的影响十分重要。本研究采用CO₂红外分析仪-动态箱法在2009年秋冬季和2010年冬春季监测了不同有机肥和氮肥处理下设施菜田土壤呼吸速率的日变化特征。结果表明:施用有机肥和秸秆明显提高设施菜田土壤呼吸速率,尤其是在高氮投入下,鸡粪和小麦秸秆混施土壤呼吸速率明显高于其他处理;不同季节各处理土壤呼吸速率的日变化特征基本一致,土壤呼吸速率的最大值出现在14:00-17:00;随着温度升高,土壤呼吸速率逐渐增加,但是过高的温度和CO₂浓度均会抑制土壤呼吸速率;上午8:00-11:00测定的土壤呼吸速率值与土壤呼吸速率日平均值基本一致,可采用上午8:00-11:00土壤呼吸速率的观测值评估设施菜田CO₂的排放量;施肥、温度和室内近地面CO₂浓度是影响不同季节土壤呼吸速率日变化的主要因素,合理调控对于实现设施蔬菜的可持续发展具有重要意义。

关键词 土壤呼吸速率 日变化特征 CO₂浓度 温度 施肥 设施菜田

中图分类号: S158.3; S625.5 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)10-1217-08

Analysis of daily dynamics of soil respiration rate in greenhouse vegetable fields

REN Tao^{1,2}, LI Jun-Liang³, ZHANG Hong-Wei³, CHEN Qing¹, WANG Jing-Guo¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract As an important component of ecosystem carbon (C) budget, soil respiration is critical for soil-plant C cycle. As an entirely different cropping system, greenhouse vegetable system is characterized as excessive nutrient input, intensive land use, high temperature and high humidity and airtight environment. All of these factors have considerable influence on soil respiration rate and C cycle. With increasing greenhouse vegetable production in China, CO₂ emission in greenhouse vegetable systems can not be ignored in the whole agricultural production system. In addition to studies of seasonal variations of soil respiration rate in greenhouse vegetable fields, understanding daily variation characteristics of soil respiration rate can enhance the estimation of the effects of CO₂ emission on the environment and crop growth in greenhouse vegetable system. Thus this study investigated the driving factors and characteristics of daily dynamics of soil respiration rate under different organic manure and N (nitrogen) fertilizer inputs in a greenhouse vegetable field. The infrared gas analyzer (IRGA)-closed chamber technique was used to analyze greenhouse vegetable conditions in 2009-2010 in Shouguang City, Shandong Province. Four measurements were taken to determine daily variations in soil respiration rate during the main growth period. The results showed that the application of organic manure and wheat straw significantly improved soil respiration rate, especially in the treatments with high N fertilizer where the soil respiration rates were highest. Although some differences existed in soil respiration rate among different treatments in different seasons, daily dynamics of soil respiration rate were similar for all the treatments. With rising temperature, soil respiration rate increased steadily and the highest soil respiration rate occurred 14:00-17:00, which was later than the highest temperature. Also with rising temperature, CO₂ increased steadily. High temperature and CO₂ concentration inhibited soil respiration rate in greenhouse vegetable fields. Based on the four

* 国家自然科学基金项目(31071858)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB119000)和现代农业产业技术体系北京市果类蔬菜创新团队项目资助

** 通讯作者: 陈清(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事设施蔬菜养分资源综合管理研究。E-mail: qchen@cau.edu.cn

任涛(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事作物养分管理及土壤肥力研究。E-mail: rentao@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2013-03-20 接受日期: 2013-07-03

measurements over the study period, soil respiration rates during 8:00–11:00 a.m. were similar to daily average rates. This suggested that soil respiration rate during 8:00–11:00 a.m. could be used to estimate CO₂ emission in greenhouse fields. Fertilization, temperature and near-ground CO₂ concentration were the main driving factors of the daily dynamics of soil respiration rate. Optimal regulation was critical for reducing CO₂ emission and enhancing sustainable development of greenhouse vegetable production in China.

Key words Soil respiration rate, Daily dynamics, CO₂ emission, Temperature, Fertilization, Greenhouse vegetable

(Received Mar. 20, 2013; accepted Jul. 3, 2013)

过量有机肥和化肥投入、频繁灌溉、高强度土地利用、高温高湿的密闭环境是设施蔬菜生产不同于其他农田生态系统的重要特征^[1-3],而这些差异均是影响土壤呼吸速率的重要因素^[4-6]。土地利用方式改变所导致的土壤呼吸速率变化对全球陆地碳循环产生重要影响,因此随着我国设施蔬菜规模的不断发展,设施菜田产生的 CO₂ 是整个农田生态系统节能减排中必须要考虑的因素。此外设施菜田每年施用大量有机肥,不仅提升了土壤有机质,而且产生的 CO₂ 对蔬菜产量也有很大影响^[7]。因此研究设施菜田土壤呼吸速率对于探索设施菜田土壤有机碳循环以及生产力具有重要意义。

一些研究表明,设施菜田土壤呼吸速率明显高于粮田及其他农作物体系^[8],不同轮作模式下菜田 CO₂ 的周年排放量为 10.3~19.4 t(C)·hm⁻²^[9],高于小麦、玉米田 CO₂ 的排放量^[10-11];何启伟等^[12]测定了山东省寿光市日光温室内 CO₂ 浓度的季节变化和日变化,指出有机肥施用对促进温室内土壤呼吸和提高 CO₂ 浓度有较大的影响;Arriaga 等^[13]也发现有机肥施用后 43 d CO₂ 的累积排放量明显高于对照处理;岳晓峰^[14]发现中等灌溉水平下日光温室土壤呼吸速率最大,并且土壤呼吸速率随施肥量的增加而增加。设施菜田土壤呼吸速率存在明显的季节性变化,但设施蔬菜生产中的密闭环境在提高温室内温度,保证作物正常生长的同时,也会影响温室内的

空气流动,进而改变近地面 CO₂ 的交换。Jin 等^[7]研究表明温室内 CO₂ 浓度呈现明显的日变化,过高的 CO₂ 浓度会影响近地面 CO₂ 的气体交换,影响土壤呼吸速率^[15],因此研究中除了关注设施菜田土壤呼吸速率季节性变化外,了解温室内 CO₂ 浓度以及土壤呼吸速率的日变化特点对于准确评估整个设施蔬菜生产中 CO₂ 排放具有重要作用。本研究采用 CO₂ 红外分析仪-动态箱法分析不同氮肥及有机肥投入下设施菜田土壤呼吸速率的日变化特征及影响因素,为研究设施蔬菜土壤呼吸速率的季节变化以及通过合理的减排措施减少设施蔬菜生产体系中 CO₂ 排放提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试温室概况

试验于 2009 年 7 月至 2010 年 6 月在山东省寿光市古城街道罗家村进行^[16-17]。日光温室是 1999 年修建的后土墙、水泥柱和竹架结构温室(图 1),常年覆盖乙烯-醋酸乙烯(EVA)多功能复合膜,每年在 8 月下旬至 9 月上旬更换塑料膜。温室有前风口和上风口 2 个通风口用以调节棚内的微气候,前风口通常在每年 5 月中旬至 9 月下旬打开,用以降低棚内温度;每年 4 月上旬至 10 月下旬间,上风口一般在早上 5:00 打开,下午 17:00—18:00 关闭;每年 11 月上旬至来年 3 月下旬,由于外界温度较低,只有早上

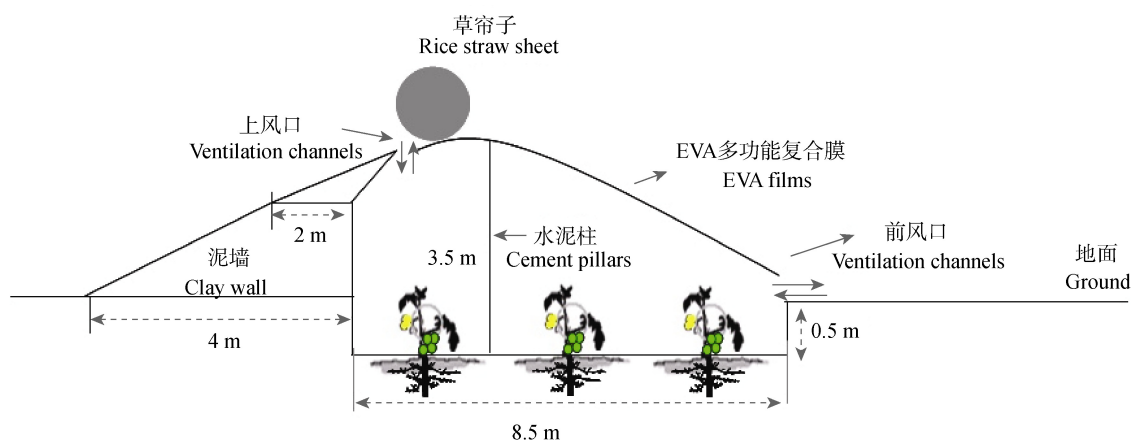


图 1 试验所选用的温室结构示意图

Fig. 1 General structure of the greenhouse in the long-term field experiment

8:00—9:00 温室内温度达到 15 °C 以上才会打开风口, 下午 14:00—15:00 关闭。遇到阴雨和雨雪天气, 风口往往关闭。每年 10 月下旬至翌年 4 月中下旬时使用稻草帘子作为温室夜间保温措施。

1.2 作物种类

供试作物为番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.), 2009 年秋冬茬(8 月至翌年 1 月, autumn-winter growing season, AW)和 2010 年冬春茬(2—6 月, winter-spring growing season, WS)番茄品种分别为“布鲁斯特”和“罗曼”, 7 月为休闲季(fallow, F)。

栽培模式为传统的双行畦栽, 畦宽 1.0 m, 畦间距 0.4 m, 行距 0.6 m, 株距 0.35~0.40 m。田间日常管理, 包括打药、打叉等均按照农户传统经验进行。

1.3 试验处理

试验设置 6 个处理: (1)对照(CK), 不施用有机肥和化学氮肥处理; (2)有机肥+秸秆处理(MN+S), 风干鸡粪和小麦秸秆混合后作基肥, 每季风干鸡粪和小麦秸秆用量分别为 8 t·hm⁻² 和 4 t·hm⁻², 其碳氮含量见表 1, 不追施化学氮肥; (3)优化氮素处理(RN), 基肥施用 8 t·hm⁻² 的风干鸡粪, 在每年 4 月份和 10 月份, 每隔 7~10 d 追施一次氮肥, 共进行 3~4 次追肥, 每次氮肥追施量为 50 kg(N)·hm⁻², 两季的氮肥用量分别为 200 kg(N)·hm⁻² 和 150 kg(N)·hm⁻²; (4)优化氮素+秸秆处理(RN+S), 有机肥与秸秆施用同 MN 处理, 化学氮肥施用与 RN 处理相同; (5)传统氮素处理(CN), 基肥施用 8 t·hm⁻² 的风干鸡粪, 根据番茄品种特性、长势以及气候状况由农户确定氮肥追施措施, 每次追施 120 kg(N)·hm⁻², 两季的氮肥用量分别为 480 kg(N)·hm⁻² 和 720 kg(N)·hm⁻²; (6)传统氮素+秸秆处理(CN+S), 有机肥与秸秆施用同 MN 处理, 化学氮肥施用与 CN 处理相同。

各处理磷钾肥用量相同, 两季磷钾肥的用量分别为 180 kg(P₂O₅)·hm⁻²、90 kg(P₂O₅)·hm⁻² 和 360 kg(K₂O)·hm⁻²、320 kg(K₂O)·hm⁻²。本试验所选用的肥料品种分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。

试验设置 3 次重复, 随机区组排列, MN+S、RN+S 和 CN+S 处理小区面积为 32.8 m², 其余处理小区面积为 21.8 m²。小区间用塑料膜隔开, 深度为 30 cm。

1.4 测定项目与方法

土壤呼吸速率的测定。本试验采用 CO₂ 红外分析仪(Infrared Gas Analyzer, IRGA; 芬兰 VAISALA 公司生产的 GMP343 二氧化碳探头, 量程为 0~3 000 μL·L⁻¹, 最小测量精度为 1 μL·L⁻¹)—动态箱—隔根法^[18]测定设施菜田土壤呼吸速率。采样箱体积为 0.5 m×0.3 m×

表 1 试验所施用的有机肥和秸秆中的有机碳、无机碳和全氮含量

Table 1 Organic C, inorganic C and total N contents of organic manure and wheat straw used in the experiment

有机肥 Manure	生长季节 Growing season	有机碳 Organic carbon (DW, g·kg ⁻¹)	无机碳 Inorganic carbon (DW, g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (DW, g·kg ⁻¹)
风干鸡粪 Chicken manure	2009 年秋冬 Autumn-winter in 2009	277	10.5	23.8
	2010 年冬春 Winter-spring in 2010	199	9.7	18.2
小麦秸秆 Wheat straw	2009 年秋冬 Autumn-winter in 2009	411	—	8.2
	2010 年冬春 Winter-spring in 2010	404	—	7.2

“—”表示未测定 “—” means unanalyzed.

0.5 m, 箱体采用 2 mm 有机玻璃设计。箱子顶部安装一个风扇, 用以混匀箱内气体以及降低箱内温度。在每个小区中间位置安装一个 0.5 m×0.3 m 不锈钢底座(图 2), 底座底部刀口约 10 cm 埋到地下, 使水槽上沿与地表齐平, 边缘用土压实, 防止漏气。采集区内不种作物, 同时考虑到番茄根系主要分布在 0~30 cm, 因此沿着底座周围埋设 4 张 0.3 m 深的塑料薄膜, 防止根系进入采样区。测定时密封水槽内加水, 以保证箱子连接处的气密性。在整个生育时期保证底座内的农事操作, 包括灌水、施肥以及耕作与周围土壤相同。

采用小型气泵调节进入红外分析仪的气体, 推荐流量为 0.5~1 L·min⁻¹。测定时, 首先将采样箱顶部和底部气管(直径 4 mm)分别与红外分析仪的进气口和出气口相连, 同时接通风扇电源, 然后打开采样器开关, 待读数稳定(接近棚内此时 CO₂ 浓度)时扣上采样箱。当读数增加时开始计数, 0 s 读数认为是此时棚内近地面 CO₂ 浓度, 之后每隔 30 s 记录一次箱内 CO₂ 浓度, 连续记录 240 s。根据单位时间箱内 CO₂ 浓度的变化计算土壤呼吸速率($R^2 > 0.90$)。

2009 年 3 月 1 日安装底座, 3 月 6 日开始测定土壤呼吸速率。2009 年 10 月 17 日和 11 月 18 日、2010 年 4 月 19 日和 5 月 26 日每隔 3 h 测定各处理土壤呼吸速率, 考虑到测定工作量, 仅选取 2 个重复测定土壤呼吸的日变化特点。在测定土壤呼吸速率日变化特点的同时, 在每个时间段分别在温室的东部、中间和西部 3 个点测定温室内近地面 CO₂ 浓度的日变化。

温室内微气候的测定。采用自动气象站自动记录温室内距离地面 1.5 m 处温湿度(AV-10TH, AVALON, U.S)、5 cm 土壤温度(AV-10T, AVALON, U.S)和土壤湿度(ECH₂O-10, AVALON, U.S)。2009 年秋冬季至 2010 年冬春季温室内主要环境参数的日变化特点见图 3。

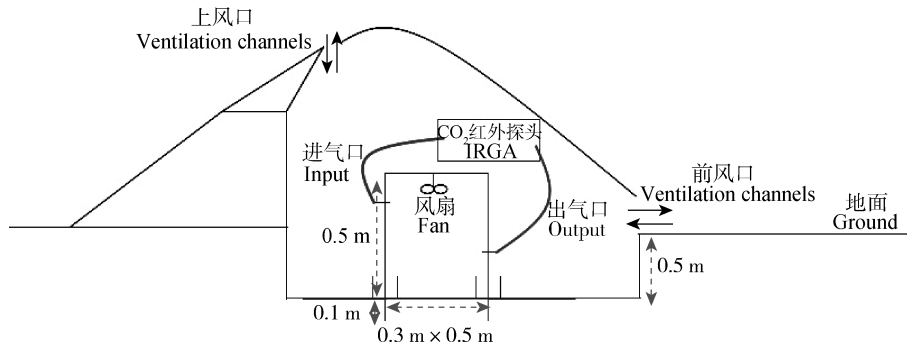


图 2 土壤呼吸测定仪结构简图

Fig. 2 General structure of IRGA-close chamber used in the experiment

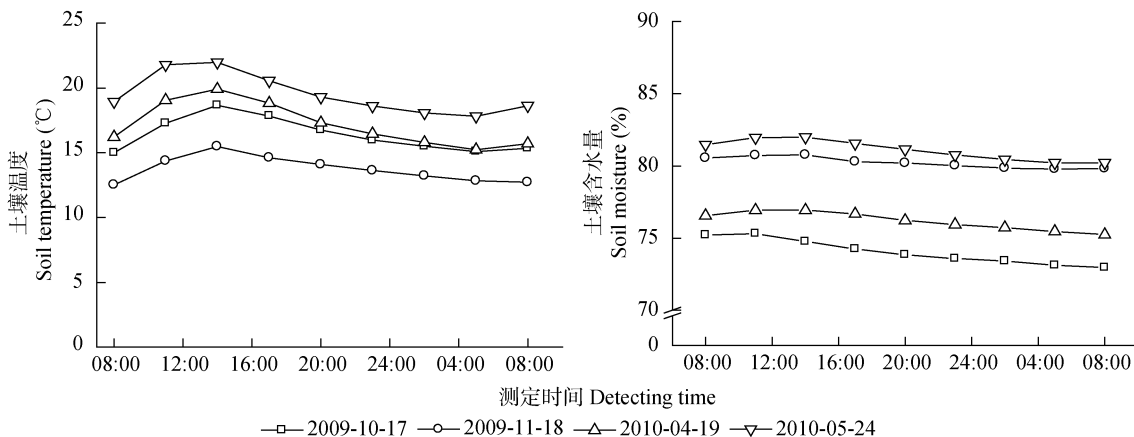


图 3 2009 年秋冬季至 2010 年冬春季不同时间温室内 5 cm 土壤温度和土壤湿度(占田间持水量的百分比)的日变化特点
Fig. 3 Daily dynamics of soil temperature and soil moisture (percentage of field capacity) in 0–5 cm layer in the greenhouse in different times from 2009 autumn-winter growing season to 2010 winter-spring growing season

1.5 数据统计与分析

利用 SPSS 17.0 软件对不同处理土壤呼吸速率日变化的平均值进行方差和相关性分析,制图采用 OriginPro 8.5 软件。

2 结果与分析

2.1 设施番茄土壤呼吸的日变化特点

从 2009 年秋冬季和 2010 年冬春季 4 次土壤呼吸速率日变化数据可以看出(图 4),施用有机肥明显提高设施菜田土壤呼吸速率,每次监测中均以对照处理(CK)土壤呼吸速率最低,传统氮素+秸秆处理(CN+S)土壤呼吸速率最高。在施用相同量风干鸡粪的基础上,氮肥投入对土壤呼吸速率的影响较小,除 2009 年 10 月 17 日测定外,优化氮素处理(RN)和传统氮素处理(CN)土壤呼吸速率日变化的平均值并无明显差异。与只施用风干鸡粪处理相比,风干鸡粪和小麦秸秆的混施增加土壤呼吸速率,尤其是在高氮肥投入情况下,其土壤呼吸速率明显高于其他处理。

尽管不同时期不同处理土壤呼吸速率不同,但是同一时期,不同处理土壤呼吸速率日变化趋势基本相同,在 2009 年 10 月 17 日和 2010 年 5 月 16 日

两次观测中,随着温度升高,各处理土壤呼吸速率呈现逐渐增加的趋势,但是土壤呼吸速率的最大值出现在 14:00—17:00,晚于温度最高值出现时间;在 2009 年 11 月 18 日和 2010 年 4 月 19 日的观测中,8:00—11:00 测定的土壤呼吸速率高于 11:00—14:00 测定值,尤其是 2009 年 11 月 18 日测定中,随着温度的升高,土壤呼吸速率呈逐渐降低的趋势。相对于白天土壤呼吸速率的明显波动,进入夜晚后土壤呼吸速率变化相对平稳,均维持在一个相对比较低的水平,但是在 2009 年 11 月 18 日和 2010 年 4 月 19 日的观测中,当第 2 天早上重新打开通风口时,土壤呼吸速率明显增加(图 5)。综合两季 4 次土壤呼吸速率日变化监测的数据来看,8:00—11:00 测定值接近当日变化的平均值,说明 8:00—11:00 的测定值可以代表土壤呼吸一天的平均值(图 6)。

2.2 温室内近地面 CO₂ 浓度日变化的季节性差异

通风口的开闭是影响温室内近地面 CO₂ 浓度的重要因素,在白天通风口打开的情况下,两个生长季节温室内近地面 CO₂ 浓度均无明显差异(图 7)。但进入夜晚后,由于不同生长季节通风措施不同,温室内近地面 CO₂ 浓度呈现明显的季节性变化。2010 年 5 月 26 日温室通风口一整天均处于打开状态,因

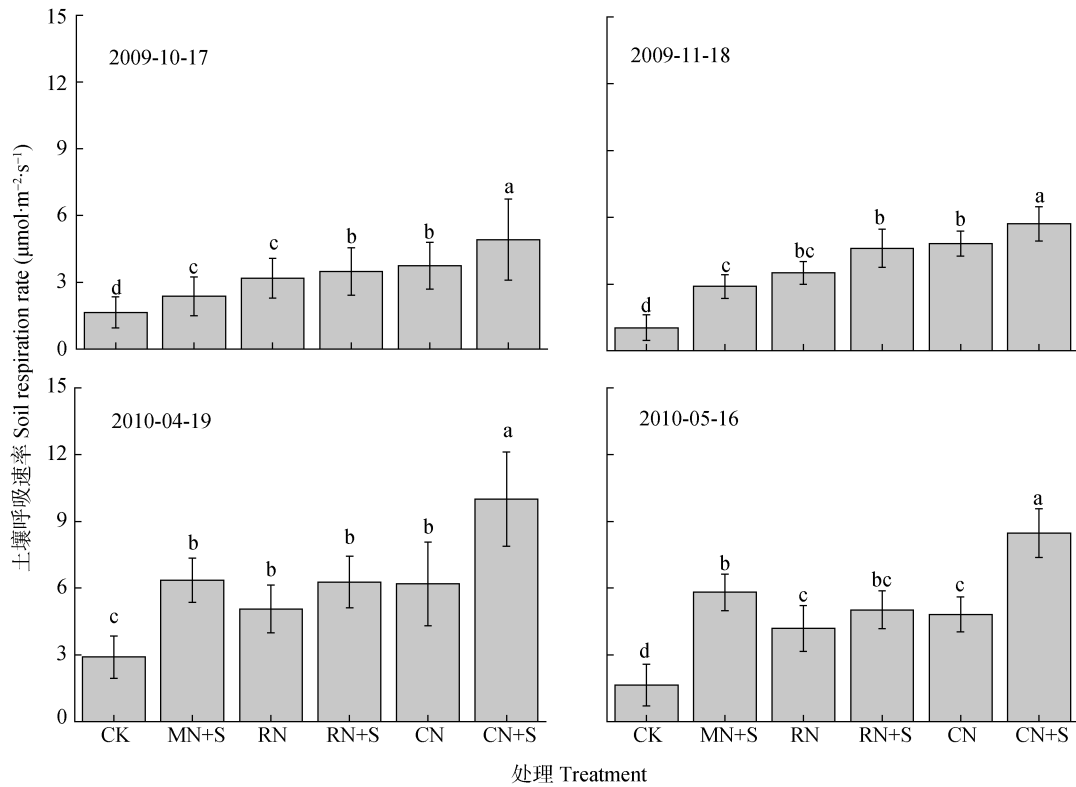


图 4 2009 年秋冬季至 2010 年冬春季不同时间设施番茄不同处理土壤呼吸速率的日平均值

Fig. 4 Daily averages of soil respiration rates under different treatments in the year-round greenhouse tomato planting system in different times from 2009 autumn-winter growing season to 2010 winter-spring growing season
同一图中不同字母表示处理间土壤呼吸速率的日平均值差异显著 ($P < 0.05$)。Different small letters mean significant difference among different treatments by LSD ($P < 0.05$).

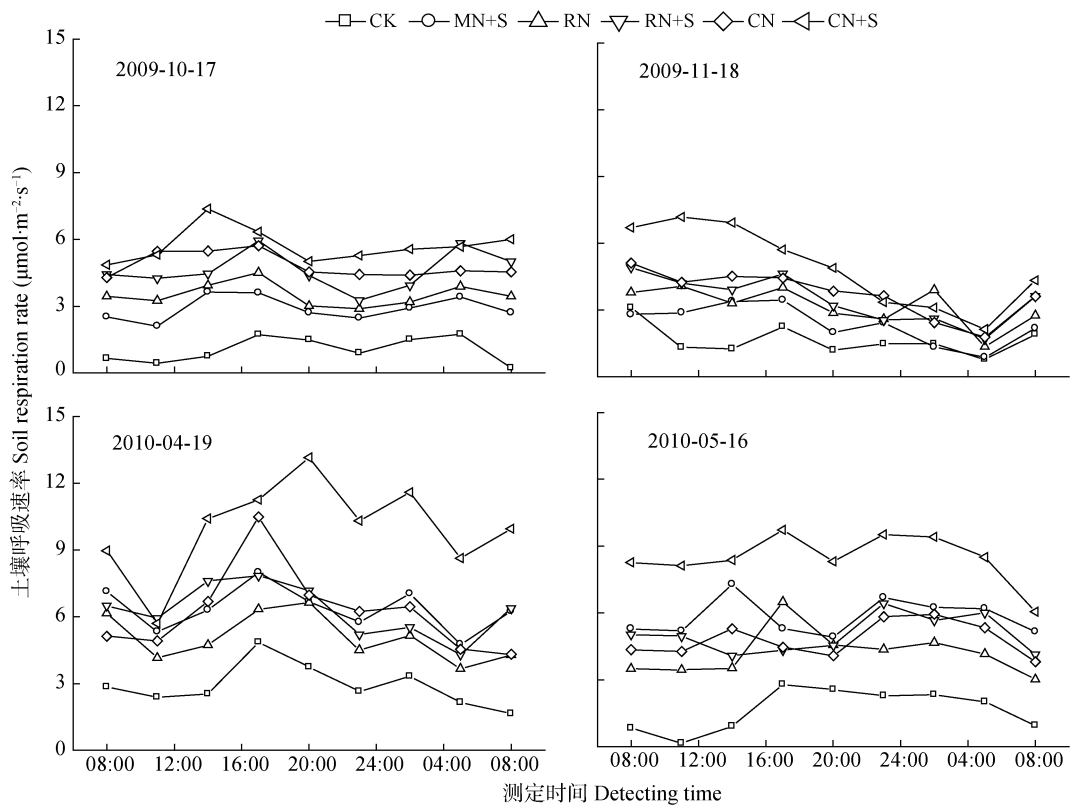


图 5 2009 年秋冬季至 2010 年冬春季不同时间设施番茄不同处理土壤呼吸速率的日变化特点

Fig. 5 Daily dynamics of soil respiration rate under different treatments in the year-round greenhouse tomato planting system in different times from 2009 autumn-winter growing season to 2010 winter-spring growing season

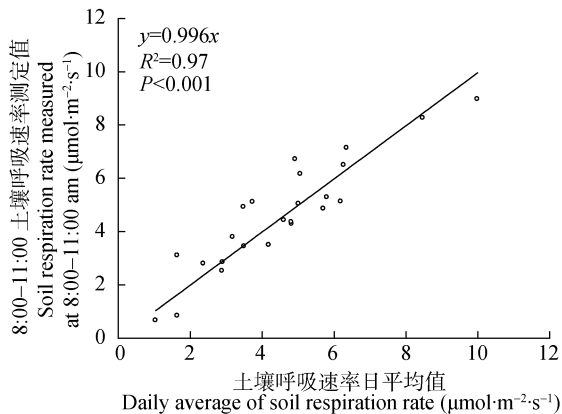


图 6 2009 年秋冬季节至 2010 年冬春季设施番茄 8:00—11:00 土壤呼吸速率与当天土壤呼吸日平均值的关系
Fig. 6 Relationship between soil respiration rates at 8:00–11:00 and the daily average in the year-round greenhouse tomato planting system from 2009 autumn-winter growing season to 2010 winter-spring growing season

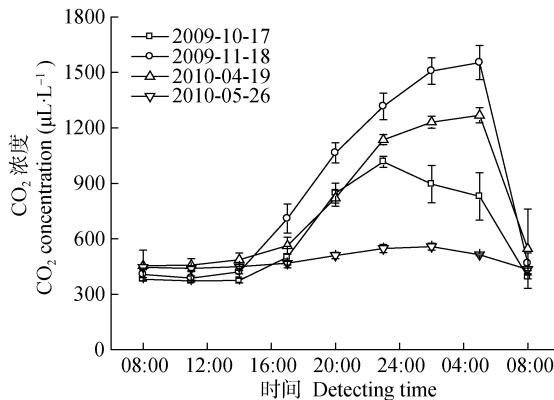


图 7 2009 年秋冬季节至 2010 年冬春季不同时间设施番茄供试室内近地面 CO₂ 浓度的日变化
Fig. 7 Daily dynamics of CO₂ concentration near ground inside the greenhouse in the year-round greenhouse tomato planting system in different times from 2009 autumn-winter growing season to 2010 winter-spring growing season

此温室内 CO₂ 浓度并未出现明显变化, 晚上棚内 CO₂ 浓度和白天浓度接近。2009 年 10 月 17 日当 17:00 关闭通风口后, 温室内 CO₂ 浓度逐渐增加, 在晚上 23:00 达到最高值。但是由于此时外界温度相对较高, 并未采取非常严格的保暖措施, 温室存在漏风的地方, 因此温室内不同位置 CO₂ 浓度变异较大。当第 2 天早上通风口重新打开时, 温室内 CO₂ 浓度逐渐恢复到正常水平。2009 年 11 月 18 日和 2010 年 4 月 19 日, 由于外界温度较低, 为了保证番茄的正常生长晚上通常会覆盖稻草帘子, 此时棚内通风条件变差, 温室内 CO₂ 浓度逐渐升高, 在第 2 天早上 5:00

达到最高值, 温室内 CO₂ 最高浓度超过 1 500 μL·L⁻¹。

2.3 温室土壤呼吸日排放的影响因素

将测定的土壤呼吸速率值以及测定当天的环境因素进行分析发现(表 2), 空气温度、5 cm 土壤温度和近地面 CO₂ 浓度是影响土壤呼吸速率日变化的重要因素。随着温度升高, 土壤呼吸速率呈现出先升高后降低的趋势, 过高的温度会抑制土壤呼吸速率, 这与前面提到的土壤呼吸速率最高值并非出现在温度的最高点相吻合。同样随着温室内近地面 CO₂ 浓度升高, 土壤呼吸速率呈现逐渐增加的趋势, 但是高浓度 CO₂ 抑制了土壤呼吸速率。

表 2 不同处理温室内土壤呼吸速率日变化和环 境参数的相关性分析

Table 2 Relationship between soil respiration rate and environmental parameters in the year-round greenhouse tomato cropping system

处理 Treatment	空气温度 Air temperature (°C)	0~5 cm 土壤温度 Soil temperature in 0–5 cm layer (°C)	0~5 cm 土壤湿度 Soil moisture in 0–5 cm layer (%)	近地面 CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration near ground (μL·L ⁻¹)
CK	0.098	-0.023	0.209 **	0.085
MN+S	0.242 **	0.447 ***	-0.096	0.145 *
RN	0.222 **	0.196 *	0.020	0.102
RN+S	0.237 **	0.327 ***	0.064	0.331 ***
CN	0.161 *	0.276 ***	0.022	0.274 ***
CN+S	0.271 **	0.334 ***	0.017	0.156 *

表示相关性极其显著($P < 0.001$), **表明相关性极显著($P < 0.01$), *表示相关性显著($P < 0.05$), 未标明表示相关性不显著。 means significant correlation at $P < 0.001$, ** means significant correlation at $P < 0.01$, * means significant correlation at $P < 0.05$, no mark means no significant correlation.

3 讨论和结论

本研究分析了不同有机肥及氮肥投入下设施菜田土壤呼吸速率日变化特点, 发现有机肥投入是影响设施菜田土壤呼吸速率的重要原因, 这与其他的报道基本一致^[7,12-13]。有机肥施用明显促进了土壤呼吸速率增加, 并且随着有机肥碳投入量的增加, 土

壤呼吸速率逐渐增加, 小麦秸秆和鸡粪混施处理土壤呼吸速率高于单施鸡粪处理。雷宝坤等^[19]研究指出, 设施菜田土壤碳氮比明显低于临近粮田, 碳是土壤微生物的限制因子, 本试验中 0~10 cm 土壤碳氮比仅为 7.5, 碳源的不足限制了微生物的生长, 因此小麦秸秆和鸡粪混施补充土壤碳源, 土壤微生物呼吸作用明显增加。但是在有机肥施用的基础上,

化学氮肥投入对土壤呼吸速率的影响则不同, 微生物生长限制因子的变化可能是影响氮素影响土壤呼吸速率变化的重要原因^[20-21]。在本试验条件下, 与传统氮素处理相比, 优化氮素处理减少一半以上的氮肥投入, 但是在整个体系中两季通过灌溉水和有机肥带入的氮分别为 $99 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $185 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $190 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $146 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮素可能并不是微生物生长的限制因子, 因此在传统的只施用风干鸡粪基础上, 氮肥施用对土壤呼吸速率的影响很小。但是补充秸秆碳源后, 土壤微生物量和微生物活性明显提高^[22], 氮素投入促进秸秆碳的分解, 传统氮素+秸秆处理土壤呼吸速率明显高于优化氮素+秸秆处理。对于 CK 处理而言, 由于连续 11 季不施用有机肥和化学氮肥, 土壤有机碳和全氮含量均明显降低^[17], 因此其土壤呼吸速率一直维持较低的水平。

尽管不同处理间土壤呼吸速率存在差异, 但是试验各处理土壤呼吸速率的日变化特点基本一致, 8:00—11:00 测定值与当天日排放的平均值接近, 这与已报道的其他体系土壤呼吸日排放特点相似^[10,23]。温度是影响土壤呼吸速率的重要因素, 2010 年冬春季测定的土壤呼吸速率值均高于 2009 年秋冬季值, 这可能与春季土壤温度高有关。一般情况下随着温度的升高, 土壤呼吸速率呈指数增加的趋势^[10,24-25]。但是在本试验条件下, 随着温度升高土壤呼吸速率呈现先升高后降低的趋势, 高温抑制土壤微生物活性^[26], 因此土壤呼吸速率的最高值与温度的最高值两者之间存在明显的错位。王艳萍等^[27]在北京郊区桃园的监测也发现类似现象, 土壤呼吸速率的最高值出现在土壤温度上升的阶段, 并非土壤温度最高值阶段。温度不仅仅影响了微生物活性, 同样决定了温室风口的开闭, 进而改变室内近地面 CO_2 浓度的变化, 影响土壤呼吸速率。Nakadai 等^[15]和王艳萍等^[27]发现土壤呼吸速率和近地面 CO_2 浓度呈负相关关系, 高 CO_2 浓度抑制了土壤呼吸速率。因此在温度较低的季节, 温室保温措施非常好, 夜间温室内 CO_2 浓度超过 $1500 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 抑制了土壤呼吸速率。当第 2 天早上 8:00 左右重新打开温室通风口时, 温室内 CO_2 浓度逐渐恢复到正常水平, 可能短时间刺激土壤呼吸, 导致测定值偏高, 这可能就是 2009 年 11 月 18 日和 2010 年 4 月 19 日 8:00—11:00 测定值高于 11:00—14:00 测定值的重要原因。

设施菜田土壤呼吸速率呈现明显的日变化特点, 有机肥和氮肥施用对设施菜田土壤呼吸速率产生明显影响, 尤其是有机肥处理。作为设施蔬菜生产体系中土壤碳的重要来源, 有机肥投入对于维持土壤肥力具有重要作用, 但是初步研究发现, 小麦秸秆

和鸡粪混施虽然增加了土壤碳源, 但其同样促进了土壤呼吸, 土壤有机碳基本维持平衡^[17], 直接补充秸秆碳显然并不是一种非常有效的提升设施菜田土壤有机质的方法。因此在了解温室内 CO_2 浓度以及土壤呼吸速率日变化和季节变化特点的基础上, 进一步摸清设施菜田土壤碳的循环特征, 探索合理的措施, 包括有机肥和氮肥施用等, 在减少菜田 CO_2 排放的同时, 提高土壤肥力, 对于实现设施蔬菜的可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 郭文龙, 党菊香, 吕家珑, 等. 不同年限蔬菜大棚土壤性质演变与施肥问题的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 85-89
- [2] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 西安市郊区日光温室大棚番茄施肥现状及土壤养分累积特性[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 287-290
- [3] 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 等. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 126-128
- [4] Merino A, Pérez-Batallón P, Macías F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of southern Europe[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 917-925
- [5] Frank A B, Liebig M A, Tanaka D L. Management effects on soil CO_2 efflux in northern semiarid grassland and cropland[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 89(1): 78-85
- [6] Arevalo C B, Bhatti J S, Chang S X, et al. Soil respiration in four different land use systems in north central Alberta, Canada[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: G01003
- [7] Jin C W, Du S T, Wang Y, et al. Carbon dioxide enrichment by composting in greenhouses and its effect on vegetable production[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(3): 418-424
- [8] Iqbal J, Hu R G, Feng M L, et al. Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: A case study at three Gorges Reservoir Area, South China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 137(3/4): 294-307
- [9] Jia J X, Ma Y C, Xiong Z Q. Net ecosystem carbon budget, net global warming potential and greenhouse gas intensity in intensive vegetable ecosystems in China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 150: 27-37

- [10] 曹庆森. 华北平原不同轮作体系及其管理措施下农田土壤呼吸研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008
Cao Q S. Soil respiration under different rotation systems and management practices in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008
- [11] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 395-401
Liang Y, Han X Z, Qiao Y F, et al. Soil respiration and carbon budget in black soils of wheat-maize-soybean rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 395-401
- [12] 何启伟, 艾希珍, 孙小镭, 等. 日光温室黄瓜栽培 CO₂ 浓度的消长规律初探[J]. 中国蔬菜, 2002(1): 7-10
He Q W, Ai X Z, Sun X L, et al. Preliminary study on dynamic changing of CO₂ concentration in sola lean to greenhouse during the cultivation of cucumber[J]. China Vegetables, 2002(1): 7-10
- [13] Arriaga H, Núñez-Zofio M, Larregla S, et al. Gaseous emissions from soil biodesinfestation by animal manure on a greenhouse pepper crop[J]. Crop Protection, 2011, 30(4): 412-419
- [14] 岳晓峰. 日光温室土壤呼吸研究[D]. 太原: 山西大学, 2006
Yue X F. Study on soil respiration in a greenhouse[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2006
- [15] Nakadai T, Yokozawa M, Ikeda H, et al. Diurnal changes of carbon dioxide flux from bare soil in agricultural field in Japan[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 19(2): 161-171
- [16] 何飞飞. 设施番茄周年生产体系中的氮素优化管理及环境效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006
He F F. Optimized nitrogen management and the impact of environment for year-around greenhouse tomato cropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006
- [17] 任涛. 不同氮肥及有机肥投入对设施番茄土壤碳氮去向的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2011
Ren T. Balance of soil carbon and nitrogen in the greenhouse tomato cropping system influenced by different nitrogen and organic manure application[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011
- [18] Alm J, Talanov A, Saarnio S, et al. Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland[J]. Oecologia, 1997, 110(3): 423-431
- [19] 雷宝坤, 陈清, 范明生, 等. 寿光设施菜田碳、氮演变及其对土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 914-922
Lei B K, Chen Q, Fan M S, et al. Changes of soil carbon and nitrogen in Shouguang intensive vegetable production fields and their impacts on soil properties[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 914-922
- [20] 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 L F, Cai Z C. Soil respiration during maize growth period affected by N application rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 9-15
- [21] Peng Q, Dong Y S, Qi Y C, et al. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration in temperate grassland in Inner Mongolia, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(6): 1163-1171
- [22] 赵小翠. 施肥与轮作对设施番茄土壤微生物群落结构的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2011
Zhao X C. Effects of fertilization and crop rotation on soil microbial community structure of greenhouse tomato[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011
- [23] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. Global Change Biology, 2001, 7(6): 667-677
- [24] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1552-1560
Chen S Y, Li J, Lu P L, et al. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9): 1552-1560
- [25] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836
Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 831-836
- [26] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬, 译. 北京: 高等教育出版社, 2007
Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment[M]. Jiang L F, Translation. Beijing: Higher Education Press, 2007
- [27] 王艳萍, 高吉喜, 冯朝阳, 等. 北京京郊果园施用不同农肥的土壤呼吸特征研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(1): 77-83
Wang Y P, Gao J X, Feng C Y, et al. Soil respiration characteristics of different fertilization types in peach farms in Beijing suburb[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2009, 35(1): 77-83