# 西北干旱区两种不同栽培管理措施下棉田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放通量研究*

李志国[1,2]　张润花[3]　赖冬梅[1]　闫正跃[4]　田长彦[1†]

（1 荒漠与绿洲生态国家重点实验室，阜康生态试验站，中国科学院新疆生态与地理研究所，乌鲁木齐　830011）
（2 中国科学院武汉植物园，武汉　430074）
（3 武汉市蔬菜科学研究所，武汉　430065）
（4 防城港出入境检验检疫局，广西防城港　538001）

**摘　要**　采用静态箱-气相色谱法对西北干旱区当前普遍采用的膜下滴灌和传统的无膜漫灌两种栽培管理下土壤 $CH_4$ 和 $N_2O$ 通量日变化和季节变化特征进行了研究。结果表明，随时间的推移，无膜漫灌栽培管理措施下棉田土壤 $CH_4$ 日变化通量呈先降后升趋势，而膜下滴灌栽培处理 $CH_4$ 排放通量日变化则呈现先升后降趋势；在整个生长季节，无膜漫灌和膜下滴灌土壤 $CH_4$ 季节变化规律不太明显，前者吸收大气 $CH_4$ 45.2 ~ 52.5 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$，后者释放 $CH_4$ 通量为 0.7 ~ 23.1 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$。两种栽培管理措施下棉田土壤 $N_2O$ 通量的日变化和季节变化均随时间的推移均呈现先升后降趋势，但是，无膜漫灌日均排放 $N_2O$ 通量显著高于膜下滴灌。在整个生长季节，无膜漫灌土壤 $N_2O$ 释放量（$N_2O$ 99.3 ~ 320.0 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$）显著高于膜下滴灌（$N_2O$ 60.0 ~ 259.0 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$）。以上结果说明，膜下滴灌栽培管理措施可以改变旱田传统无膜漫灌栽培土壤与大气 $CH_4$ 的交换方向，促进土壤 $CH_4$ 向大气的排放，但对 $N_2O$ 通量日变化和季节变化规律不产生影响，显著降低土壤 $N_2O$ 的排放量。

**关键词**　膜下滴灌；无膜漫灌；农田管理措施；$CH_4$；$N_2O$；静态箱

**中图分类号**　S143.1　　**文献标识码**　A

$CH_4$ 和 $N_2O$ 是大气中重要的温室气体，日益受到人们的关注。这不仅因为其浓度在过去一个世纪以来由于人类的工农业生产活动的干扰而迅速增加[1]，而且由于 $CH_4$ 和 $N_2O$ 分子具有较强的红外线吸收能力和较高的增温效应系数，并且在大气中具有较长的化学寿命（$CH_4$ 大约 10 ~ 12 a，$N_2O$ 大约 120 a）[2-3]，其单分子的增温潜势分别是 $CO_2$ 的 20 倍 ~ 30 倍和 150 倍[4]。

农田生态系统作为一种重要的陆地生态系统，约占陆地生态系统面积的 14%，是大气 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的重要源和汇之一[5]。近年来，由于人类对土地利用方式的改变和农业中不合理的管理措施的应用（过量施用化肥、深耕和漫灌等）[6]，改变了农田土壤环境，影响农田土壤对大气 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的产生和吸收能力，致使农田土壤原来的 $CH_4$ 和 $N_2O$ 源汇双重功能改变为单一的源功能，增大了农田土壤-植物系统 $CH_4$ 和 $N_2O$ 平均排放通量。例如，代光照等[7]报道施用氮肥不仅直接导致含氮气体的释放增加，而且还升高了土壤对 $CH_4$ 的吸收。蒋静艳等[8]也报道施用秸秆（13.5 t $hm^2$）在连续淹水条件下，$CH_4$ 排放量与秸杆施用量成正比，$N_2O$ 排放量与秸杆施用量成反比。因此，迫切需要综合调查和定量研究当前农业各种管理措施下 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放特征及其影响因子。

膜下滴灌栽培技术可以通过防止蒸发和提升土壤深层水分至作物可利用层来增加土壤中有效含水量[9-10]、提高土层温度[11]、改善土壤结构[12]，从而达到提高作物产量和效益的目的[13]。因此，这种地膜栽培技术已经逐步替代了传统的栽培方式，特别是在我国新疆地区，据农业部统计，2007 年我国新疆地膜栽培面积已达 100 万 $hm^2$[14]。随着推广应用面积和应用作物范围的扩大，地膜覆盖面积仍

* 国家自然科学基金面上项目（40971148）、中国科学院“百人计划（2009）”项目共同资助

† 通讯作者，E-mail：Tianchy@ms.xjb.ac.cn
作者简介：李志国（1982—），男，山西文水人，博士研究生，助理研究员，主要研究方向为陆地生态系统碳氮循环。E-mail：lzg250@126.com

收稿日期：2011 - 08 - 25；收到修改稿日期：2012 - 06 - 30

有增大趋势。那么地膜覆盖栽培人为改变土壤原始环境的土壤管理措施，尤其薄膜的机械阻隔作用是否会影响到农田生态系统土壤温室气体的交换，引起农田生态系统对大气温室气体碳源汇功能变化？Okuda 等[15]在日本采用静态箱法研究了地膜覆盖对果园温室气体的影响，结果表明地膜覆盖可以降低 $N_2O$ 的释放，而对 $CH_4$ 没有影响。而朱咏莉等[16]报道，地膜覆盖促进土壤 $N_2O$ 的释放。目前，关于地膜栽培方式对土壤 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放特征的报道还不一致，仍存在许多争议，仍需进一步的研究。

本研究采用静态箱/气相色谱法，在现代膜下滴灌和传统无膜漫灌两种栽培管理下，进行了棉田土壤气体 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放及其环境因子的观测研究，探讨膜下滴灌和无膜漫灌对棉田温室气体排放日变化和季节变化特征及其影响因子，为我国今后制定温室气体减排的农业措施提供依据。

# 1　材料与方法

## 1.1　研究区概况

大田实验于 2009 年 4 月至 2010 年 10 月在中国科学院新疆阜康荒漠生态站盐生荒漠上开垦 15a 的农田进行，主要种植棉花。该站地处天山北麓、古尔班通古特沙漠南缘。该区属于中纬度欧亚大陆腹地，为典型的温带大陆性气候，夏季炎热而冬季寒冷。最高气温 42.6℃，最低气温 −41.6℃，最热月平均气温 25.6℃，最冷月平均气温 −19.4℃，年平均气温 6.2℃。≥10℃ 的年积温为 3 606℃，无霜期 174 d。年降水量 160 mm，年蒸发量 2 000 mm。春夏降水约占全年降水量的 2/3，年平均相对湿度 58%，年平均日照时数为 2 562 h。土壤为灰漠土[17]。土壤基本性状用表层 0 ~ 20 cm 土壤测定，土壤容重 1.56 g $cm^{-3}$，土壤 pH8.42，电导率 2.08 mS $cm^{-1}$，土壤有机碳含量 C 5.64 mg $g^{-1}$，全氮 0.74 g $kg^{-1}$，速效氮 38.09 mg $kg^{-1}$。

## 1.2　试验材料与设计

试验设置了两个处理：膜下滴灌（MD）和无膜漫灌（MFF，对照）。两种处理均在同一地块，每个处理又各有 3 个重复小区，各小区面积为 60 $m^2$，随机排列。MD 采用聚乙烯薄透明膜（膜宽 125 cm，厚度 0.01 ~ 0.02 mm），播种时，先将滴灌带铺好，地膜覆盖，然后在地膜上每隔 10 cm 挖洞播种，播种后用土覆盖（示意图见图 1）。新疆地区的膜下滴灌栽培管理在棉花整个生长季节均覆盖地膜，所以在本试验中测定气体通量时均保证地膜的完整性（如有破损及时更换）。MD 灌溉方式采用滴灌，MFF 灌溉方式采用漫灌，灌溉时间和频率与当地田间操作一致，具体时间依照当地的实际气象条件和植物的生长情况进行调整，灌溉水量通过水表读出（表 1）。棉花品种为新陆早 6 号。两处理施氮肥和磷肥量相同，分别为 N 100 kg $hm^{-2}$ 和 $P_2O_5$ 72 kg $hm^{-2}$，在灌溉时随灌溉水分次施入。两处理棉花种植密度相同，均为 $2.67 \times 10^5$ 株 $hm^2$。试验小区的其他田间管理措施保持一致。

**表 1　膜下滴灌和无膜漫灌的日期和灌溉量**

**Table 1**　Date and volumes of mulched drip irrigation (MD) and mulch-free flood irrigation (MFF) of the cotton fields

| 处理 Treatments | 播种日期 Planting date (yyyy-mm-dd) | 灌溉日期 Irrigation date (yyyy-mm-dd) | 灌溉量 Irrigation volume ($m^3$ $hm^{-2}$) |
|---|---|---|---|
| 膜下滴灌 MD | 2009 − 04 − 21 | 2009 − 05 − 12 | 190 |
| | | 2009 − 06 − 05 | 255 |
| | | 2009 − 06 − 19 | 255 |
| | | 2009 − 07 − 06 | 375 |
| | | 2009 − 07 − 23 | 375 |
| | | 2009 − 08 − 10 | 375 |
| | | 2009 − 08 − 30 | 375 |
| | 2010 − 04 − 29 | 2010 − 06 − 09 | 255 |
| | | 2010 − 06 − 28 | 375 |
| | | 2010 − 07 − 15 | 375 |
| | | 2010 − 07 − 29 | 375 |
| | | 2010 − 08 − 17 | 375 |
| | | 2010 − 08 − 30 | 375 |
| 无膜漫灌 MFF | 2009 − 04 − 21 | 2009 − 05 − 12 | 700 |
| | | 2009 − 06 − 05 | 1 400 |
| | | 2009 − 06 − 23 | 1 400 |
| | | 2009 − 08 − 15 | 1 400 |
| | 2010 − 04 − 29 | 2010 − 06 − 09 | 700 |
| | | 2010 − 06 − 28 | 1 400 |
| | | 2010 − 07 − 29 | 1 400 |
| | | 2010 − 08 − 17 | 1 400 |

## 1.3　气体采集与分析

采用人工静态箱法采集田间气样[18]。采样箱由箱体（地上部分）和箱底座（地下部分）组成。其中箱体由不锈钢板做成，呈长方体（75 cm × 50 cm × 50 cm），箱体外粘贴一层 3 cm 的泡沫隔热板，外覆白色防雨布以防止太阳辐射下箱内温度的升高而影响观测结果。顶部内测安装了温度计和 2 个由 12 V DC 供电的小风扇（风速 12 m $s^{-1}$）。箱体底部开口（与箱底座吻合扣于底面之上）。棉花播种后，在每处理农田中各安装 3 个静态箱底座进行 3 次重

复测定。基座位置按照膜宽和行间距裸地宽度埋设,如图 1 所示。基座埋入土中 5 cm 后将不再移动。取样时,采样箱垂直安放在底座凹槽内并用水密封,以保证箱内气体不与大气进行气体交换。采样前,将箱内顶部风扇打开,使箱内气体混和均匀,在盖箱之初及之后的 10、20 和 30 min 用 100 ml 注射器从箱中抽取气体,通过旋转三通阀转移至 0.5 L 气体采样袋待测。

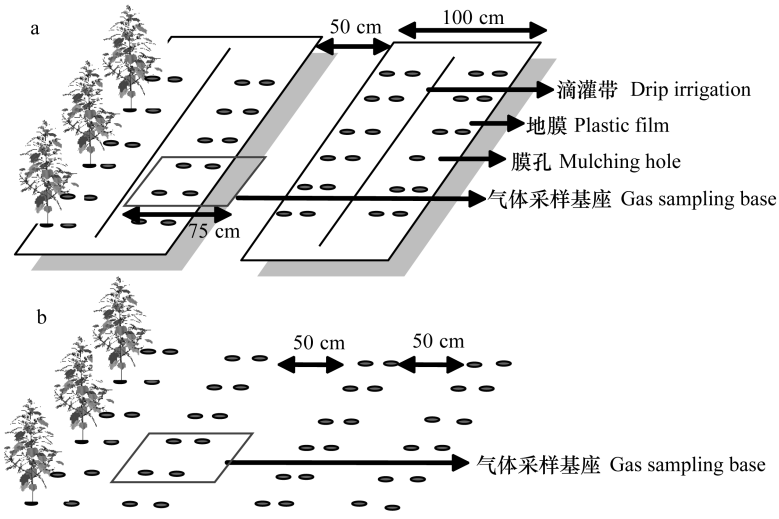


图 1 膜下滴灌(a)和无膜漫灌(b)处理试验设计示意图

Fig. 1 Layout in the experiment in the cotton field for (a) the mulched drip irrigation and (b) mulch-free flood irrigation

气体采用改装后的 HP4890N 型色谱仪测定[19],测定 $CH_4$ 的检测器为 FID(氢火焰离子化检测器),$N_2O$ 检测器为 ECD(电子捕获检测器)。从 2009 年 4 月 20 日整地开始时进行采样,每隔 15 d 测定 1 次,共测定 13 次,每次测定均在 9:00 ~ 11:00 完成。日变化选在棉花苗期、花铃期和吐絮期各做一次,日测定时刻为 10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、21:00、24:00、03:30、07:00、10:00。排放通量由箱中气体浓度随时间的变化率计算得出,排放通量和年排放通量计算方程如下:

$$F = \frac{\Delta m}{A\Delta t} = \frac{\rho V \Delta c}{A\Delta t} = \rho H \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (1)$$

$$F_T = \sum_{n=i} (F_i + F_{i+1}) \times (t_{i+1} - t_i) \times \frac{1}{2} \times 24 \quad (2)$$

式中,$F$ 为被测气体流通量(mg m$^{-2}$ h$^{-1}$);$\Delta m$ 为 $\Delta t$ 时间内采样箱中气体质量(g);$A$ 为采样箱底面积(cm$^2$);$\rho$ 为实验室温度下的气体密度(g cm$^{-3}$);$V$ 为采样箱体积(cm$^3$);$\Delta c$ 为 $\Delta t$ 时间内采样箱中气体混合比浓度;$H$ 为采样箱高度(cm);$F_T$为待测气体年排放通量(mg m$^{-2}$);$i$ 为测定次数;$F_i$为日均排放通量;$t$ 为测定时间。在每次采样时,用 JM624 型便携式数字温度计测定各箱的气温、地表温度、地下 5 cm的土壤温度。温度计的测量范围在 -30℃ ~ 50℃,测量准确度为 0.5℃,读数分辨率为 0.1℃。

### 1.4 环境因子测定

气压、风速、降雨量等气象资料的收集通过中国科学院阜康野外监测站气象站(距离试验地点百米范围内)获得。

### 1.5 统计分析方法

运用 SPSS16.0 进行方差及相关关系分析,并运用 Origin7.5 软件作图。

## 2 结 果

### 2.1 土壤温度和土壤水分含量季节动态变化

从图 2 可以看出,在 2009 年和 2010 年,土壤温度在整个生长季节均呈明显的季节变化。两处理相比,MD 土壤温度在植物生长前期显著高于 MFF。但是,随时间推移和棉花植株的生长,MD 地上植株冠幅高,土壤温度下降快,致使土壤温度在棉花生长后期低于 MFF。MD 和 MFF 土壤含水量随灌溉次数和水量变化呈现多峰曲线,但总体上看,MD 土壤含水量显著高于 MFF,其原因主要是由于浇灌次数多,并且地面被不透气的薄膜覆盖,减少土壤水分蒸发,增大土壤含水量。

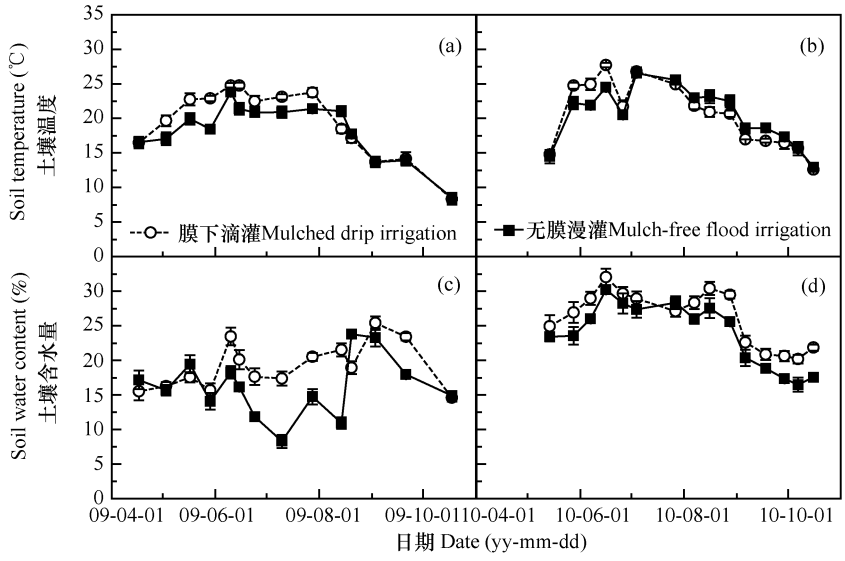


图 2　2009 年(a 和 c)和 2010 年(b 和 d)年新疆膜下滴灌(MD)和无膜漫灌(MFF)栽培管理措施下棉田土壤温度和土壤含水量季节变化

Fig. 2　Seasonal variations of soil temperature and soil water content in the MD (○) and MFF (■) treatments over the cotton growing season in 2009 (a and c) and 2010 (b and d)

## 2.2　棉田土壤 $CH_4$ 的排放特征

**2.2.1**　土壤 $CH_4$ 通量日变化　　图 3 为 MD 和 MFF 两种处理下土壤 $CH_4$ 通量的日变化，正值代表土壤向大气排放 $CH_4$，负值代表土壤吸收大气 $CH_4$。从图 3 可见，在整个生长季节，MD 处理 $CH_4$ 通量均随气温的上升而上升，在大约 12:00 时，方向发生改变，由吸收转变成排放，直至下午 16:00 ~ 18:00 左右，升高至最大值，之后，其值开始回落，在大约下午 20:00 时，再次转变为吸收，在晚上 03:00 ~ 04:00 时，降到最小值。然而，与 MD 相比，MFF 处理 $CH_4$ 通量日变化则完全表现相反趋势，随着气温的上升而下降，在大约下午 18:00 时出现最小值，之后开始上升。此外，不同生长季节，MFF 处理 $CH_4$ 通量在一天当中出现负值的时间段不同，在 6 月份，一天当中 $CH_4$ 通量方向基本是负值，即均表现吸收过程(图 3a)，而在 7 月和 9 月份，仅在 12:00 ~ 16:00时段内出现了向大气排放 $CH_4$ 的过程(图 3b 和图 3c)。总体上来看，MFF 处理 $CH_4$ 日均吸收大气通量为 0.39 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$，而 MD 处理日均向大气释放 $CH_4$ 通量 0.08 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$。

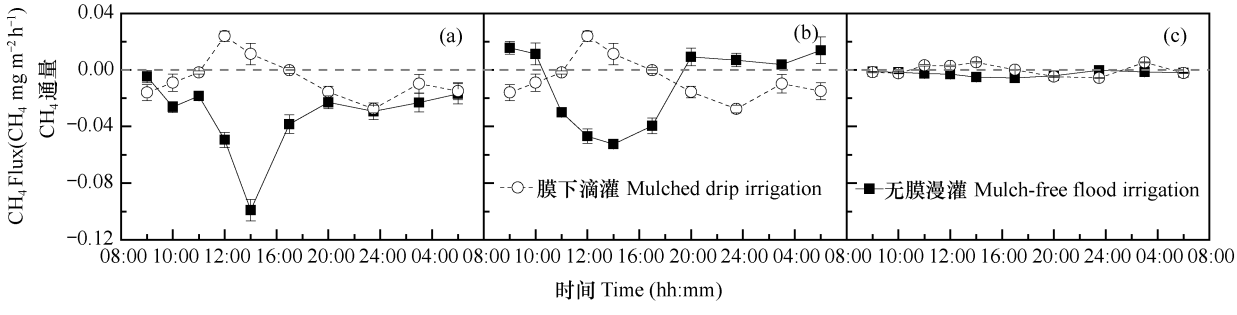


图 3　2009 年 6 月 10 日、7 月 10 日和 9 月 24 日新疆膜下滴灌(MD)和无膜漫灌(MFF)栽培管理措施下棉田土壤 $CH_4$ 通量日变化特征

Fig. 3　Diurnal variations of $CH_4$ emission flux in MD (○) and MFF (■) in (a) 10 June, (b) 10 July, and (c) 24 September over the cotton entire growing season in 2009

**2.2.2** 土壤 $CH_4$ 通量季节变化 从两年棉田 MD 和 MFF 处理土壤 $CH_4$ 通量季节变化的观测数据可以看出(图 4),在整个生长季节,不同栽培管理措施对棉田 $CH_4$ 通量存在极显著差异($p < 0.01$)。MD 处理土壤 $CH_4$ 通量主要表现多峰型季节变化,且具有明显的年际差异,2009 年通量方向主要表现为土壤向大气排放,年释放强度为 5.76 mg $m^{-2}$,显著高于 2010 年释放通量,0.72 mg $m^{-2}$。MFF 处理土壤 $CH_4$ 通量也表现多峰型季节变化,但通量方向基本上均为土壤吸收大气 $CH_4$,吸收的强度同样具有明显的年际差异,2009 年整个生长季节的年排放通量为 52.56 mg $m^{-2}$,高于 2010 年排放通量 45.12 mg $m^{-2}$。

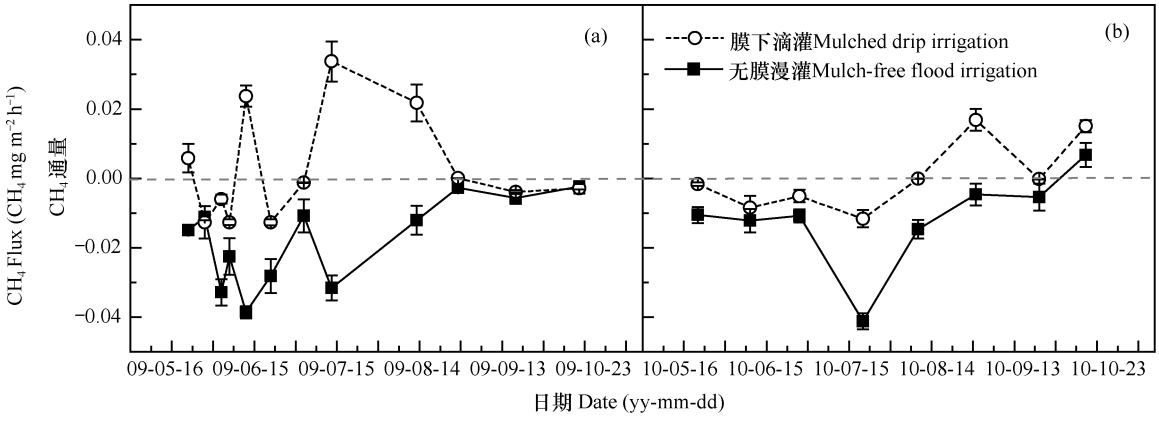


图 4 2009 年(a)和 2010 年(b)新疆膜下滴灌(MD)和无膜漫灌(MFF)栽培管理措施下棉田土壤 $CH_4$ 通量季节变化特征

Fig. 4 Seasonal variations of $CH_4$ emission flux in the MD (○) and MFF(■) over the cotton growing season in 2009 (a) and 2010 (b)

## 2.3 棉田土壤 $N_2O$ 的排放特征

**2.3.1** 土壤 $N_2O$ 通量日变化 新疆棉田 MD 和 MFF 处理下土壤 $N_2O$ 通量日变化进程如图 5 所示。在不同生长季节,其日变化趋势基本相同,均随着时间的进程呈现先升后降曲线特征,所不同之处就是通量变化幅度和峰值出现的时间。7 月份两处理土壤 $N_2O$ 通量日变化幅度要显著高于 6 月和 9 月,且峰值出现的时间也提前至下午 14:00。与 MFF 相比,7 月份 MD 处理土壤 $N_2O$ 日排放通量为 1.50 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$,显著高于 MFF 日排放通量 0.94 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$,而在 6 月份和 9 月份,两处理比较差异不大,MD 处理土壤 $N_2O$ 日排放通量分别为 0.37 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$ 和 0.25 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$,略高于 MFF 处理土壤 $N_2O$ 日排放通量 0.35 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$ 和 0.23 mg $m^{-2}$ $d^{-1}$。

**2.3.2** 土壤 $N_2O$ 通量季节变化 从 2009 年和 2010 年棉田土壤 $N_2O$ 通量季节变化的观测数据可以看出(图 6),在整个生长季节,MD 和 MFF 处理下 $N_2O$ 通量季节变化趋势基本上相同,均呈先升后降单峰曲线,但年际之间排放峰值出现的时间和强度有所差异,2009 年两种处理下土壤 $N_2O$ 通量均在 7 月中旬达到最大值,分别为 0.08 和 0.04 mg $m^{-2}$ $h^{-1}$,而 2010 年峰值出现在六月中旬,分别为 0.26 和 0.16 mg $m^{-2}$ $h^{-1}$。年际之间的差异,其原因可能是由于 2010 年较高土壤温度和含水量导致。两处理之间相比而言,在试验期间,MD 土壤 $N_2O$ 年释放通量为 57 mg $m^{-2}$(2009 年)和 259 mg $m^{-2}$(2010 年),显著低于 MFF 年释放通量 99.3 mg $m^{-2}$(2009 年)和 320.0 mg $m^{-2}$(2010 年)。

## 2.4 土壤温度和土壤水分对棉田土壤 $CH_4$ 通量的影响

土壤 $CH_4$ 通量与 0 ~ 10 cm 土壤温度(12℃ ~ 30℃)和水分含量(变化范围 10% ~ 22%)之间的相关关系如图 7 所示,MD 和 MFF 处理下土壤 $CH_4$ 通量均与 0 ~ 10 cm 土壤温度和水分含量呈现负相关,即土壤温度和水分含量越高,则土壤对 $CH_4$ 排放通量越弱;反之,吸收越强,且土壤温度对土壤 $CH_4$ 通量的影响要强于土壤水分。MD 与 MFF 处理相比较而言,MD 土壤水分含量为 14% 和土壤温度 22℃时,土壤 $CH_4$ 吸收和排放通量达到平衡状态,土壤含水量和温度分别低于 14% 和 22℃时,土壤表现向大气释放 $CH_4$ 的状态,反之,则呈现吸收状态。而 MFF 处理下土壤 $CH_4$ 通量吸收和排放达到平衡状态的水分含量和温度要低于膜下滴灌,分别为 13% 和 17℃。当土壤含水量和土壤温度低于 13% 和 17℃时,呈现向大气排放 $CH_4$ 状态,反之,呈现吸收状态。

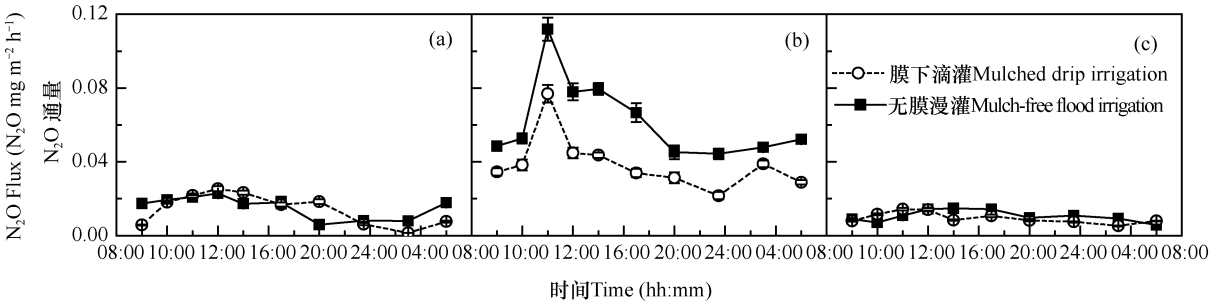


图 5　2009 年 6 月 10 日、7 月 10 日和 9 月 24 日新疆膜下滴灌(MD)和无膜漫灌(MFF)栽培管理措施下棉田 $N_2O$ 通量日变化特征

Fig. 5　Diurnal variations of $N_2O$ emission flux in MD (○) and MFF (■) in (a) 10 June, (b) 10 July, and (c) 24 September over the growing season in 2009

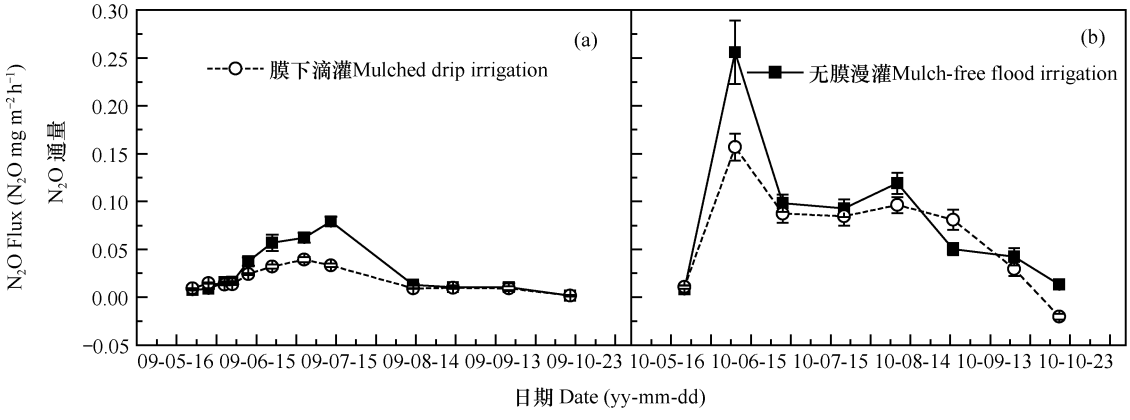


图 6　2009 年(a)和 2010 年(b)新疆膜下滴灌(MD)和无膜漫灌(MFF)栽培管理措施下棉田土壤 $N_2O$ 通量季节变化特征

Fig. 6　Seasonal variations of $N_2O$ emission flux in MD (○) and MFF (■) over the cotton entire growing season in 2009 (a) and 2010 (b)

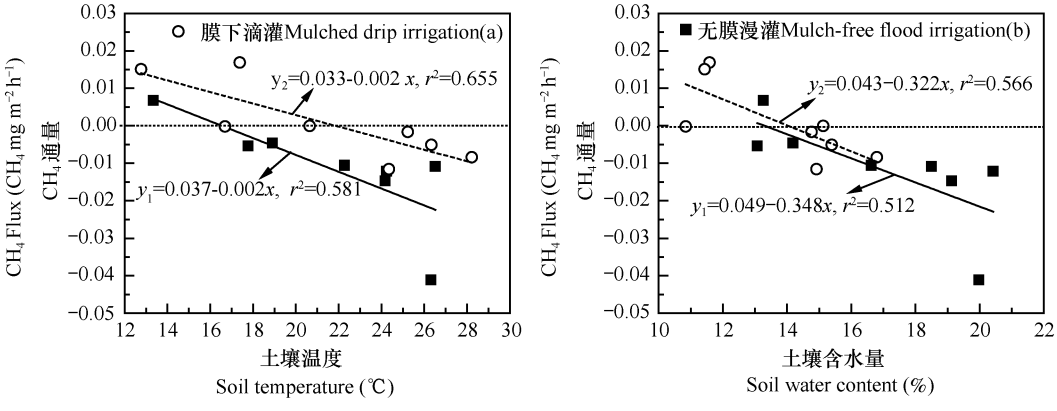


图 7　2010 年棉田土壤 $CH_4$ 通量季节变化与 0 ~ 10 cm 土壤温度和水分的相关性

Fig. 7　Relationship of the seasonal variation of $CH_4$ flux with soil temperature and moisture in the layer 0 ~ 10 cm in the cotton field in 2010

### 2.5 土壤温度和土壤水分对棉田土壤 $N_2O$ 通量的影响

土壤 $N_2O$ 通量与 0～10 cm 土壤温度(12～30℃)和水分含量(变化范围 10%～22%)之间的相关关系如图 8 所示,MD 和 MFF 两种处理下土壤 $N_2O$ 通量均与 0～10 cm 土壤温度和水分含量呈现正相关,土壤水分对 $N_2O$ 通量的影响较温度要大。此外,从图 8 还可以看出,随土壤温度和土壤水分的升高,MFF 处理下土壤 $N_2O$通量升高的速率(0.095 和 1.952)快于 MD 处理下 $N_2O$ 通量升高的速率(0.006 和 1.711)。

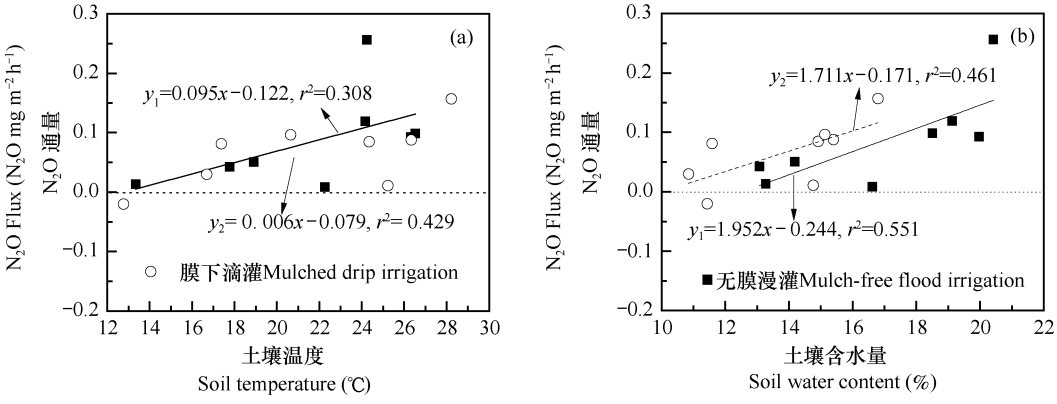


图 8 2010 年棉田土壤 $N_2O$ 通量季节变化与 0～10 cm 土壤温度和水分的相关性

Fig. 8 Relationship of the seasonal variation of $N_2O$ flux with soil temperature and moisture in the layer 0～10 cm in the cotton field in 2010

## 3 讨 论

### 3.1 不同栽培管理措施对棉田土壤 $CH_4$ 排放通量的影响

许多研究表明,旱区农田土壤是大气 $CH_4$ 汇,是调节大气 $CH_4$ 浓度的重要过程[20-21]。本实验结果也表明,干旱区 MFF 栽培管理下棉田土壤 $CH_4$ 排放通量的日变化和季节变化均表现吸收(图 2 和图 3),且随着温度的上升,吸收强度越大,是大气 $CH_4$ 的汇。这一结果与许多旱地农田土壤 $CH_4$ 通量特点一致[22-23]。究其原因是因为干旱区农田土壤质地较干燥,具有良好的土壤空隙状况,氧气易于扩散到土壤中,促进土壤中介导甲烷氧化微生物(如甲烷氧化菌)和甲烷氧化酶(如甲烷单加养酶)的活性[24],增大了土壤吸收氧化大气 $CH_4$ 的能力;此外,产甲烷产生菌,在有氧气或者氧化性物质存在时,催化还原小分子有机物形成甲烷的过程会受到影响[25]。因此,干旱地区农田土壤基本都是大气 $CH_4$ 的汇。

许多研究表明[18,26],旱田土壤 $CH_4$ 通量具有明显的日变化,随土壤温度升高而升高,午后达到峰值,本实验同样发现此变化规律(图 2)。旱田土壤空隙状况良好,富含大量好氧细菌。土壤氧化菌多为专性好氧细菌,且属于中温性微生物,与温度密切相关[23-24]。午后土壤温度通常在一天中最高,因此,旱田土壤 $CH_4$ 日变化与土壤温度日变化趋势一致,午后出现 $CH_4$ 吸收峰值。但是,在本实验中,MD 处理下 $CH_4$ 日变化规律则表现相反趋势,随气温的上升而下降,在大约下午 18:00 时出现最小值,这一结果出乎我们的预料。Seneviraten 等[27]在对湿地热带高原土壤覆盖排放 $CH_4$ 中也发现此现象。我们分析导致这一现象的原因可能是与地膜这种特殊栽培管理而导致的土壤微生物的种群数量、类型和活性不同有关[15]。MD 处理土壤长期地膜覆盖,氧气难于进入土体中,加上植物根系的呼吸耗氧过程,加剧了土壤氧化还原电位,尤其在白天或者植物旺长阶段(图 3 和图 4),为产甲烷菌提供了良好的环境,促进了土壤 $CH_4$ 的产生和排放量。此外,Seneviraten 等[27]还认为,地膜覆盖阻止了土壤水分的蒸发以及土壤易氧化有机质的分解,在一定程度上会导致土壤厌氧环境的形成,促使大量 $CH_4$ 的产生。

在本实验中还发现,MFF 和 MD 处理下 $CH_4$ 季节变化不明显,表现多峰曲线,且均未与土壤温度季节性变化呈同步变化,这与以往研究中报道的结果[8,18,21]一致。这说明旱地土壤 $CH_4$ 的产生和排放除土壤温度影响外还受其他因子的影响,例如土壤水分。徐华等[25]报道,土壤干湿交替变化促进土壤 $CH_4$ 的排放。齐玉春等[18]的研究结果也证实了旱

地 $CH_4$ 的排放强度在很大程度上取决于土壤水分状况，降雨或浇灌后的一段时间内会阻碍大气 $CH_4$ 向土壤的扩散，影响土壤氧化 $CH_4$ 的能力，同时，在土壤局部区域可以形成厌氧区，形成短时间的 $CH_4$ 正排放。本实验对土壤水分和 $CH_4$ 排放通量也进行了相关性分析，发现土壤水分和 $CH_4$ 之间呈现显著的负相关关系（图 7）。这一结果说明土壤水分也是旱地农田 $CH_4$ 通量的主导环境影响因子之一，并且我们认为土壤水分在旱地农田土壤所起的作用主要是促进对大气 $CH_4$ 的吸收。Mosier 等[28] 的研究也认为，土壤在干燥状态，土壤含水量的升高会显著提高对大气 $CH_4$ 的氧化吸收。根据 Gulledge 和 Schimel[29] 土壤甲烷通量和水分抛物线的拟合方程，土壤氧化甲烷的最佳含水量为 28.3%，土壤在低于最佳含水量时，土壤 $CH_4$ 排放通量随着土壤含水量的增加而降低。本实验观测的土壤含水量变化范围在 10%~22% 之间，尚未达到土壤甲烷氧化的最佳含水量，因此，土壤氧化吸收大气 $CH_4$ 强度随土壤水分的增加而增加，这与 Gulledge 和 Schimel[29] 的研究结论极为符合。

由此可见，旱地农田土壤 $CH_4$ 通量强度并非某个单因子调控，在温度和水分条件均处于亚适宜水平时，主要取决于土壤温度和水分等因子的配合程度。其他栽培管理措施（地膜覆盖）也可显著影响土壤吸收氧化和产生 $CH_4$ 的能力，甚至改变土壤 $CH_4$ 对大气 $CH_4$ 的源汇功能。

### 3.2　不同栽培管理措施对棉田土壤 $N_2O$ 排放通量的影响

农田土壤是全球最主要的 $N_2O$ 排放源，贡献率高达 70%~90%[30]。农田不同管理措施下土壤中的 $N_2O$ 排放量差异较大[23]。许多研究认为，不同管理措施下土壤温度和水分的差异是导致土壤 $N_2O$ 不同排放量的主要原因[6,8,20]。我们知道，土壤中的 $N_2O$ 主要产生于微生物参与的硝化和反硝化的生物化学过程，土壤温度和水分的变化显著影响所涉及的一系列微生物的数量、结构和活性[23]。前人也较多报道，地表土壤 $N_2O$ 通量与温度和土壤水分呈显著正相关[19,22-23]。本实验同样发现，在这两种管理措施下，地表土壤 $N_2O$ 通量日变化和季节变化均随着土壤温度的日变化和季节变化而变化。相关性分析也得出，土壤温度和水分均与土壤 $N_2O$ 通量呈正相关，且土壤水分对 $N_2O$ 的影响大于温度，这与前人的结果一致[23]。然而，奇怪的事是，在本实验中，MD 土壤温度和水分含量均显著高于 MFF，据此推测，MD 土壤 $N_2O$ 的排放量应高于 MFF，但实际观测却发现，土壤 $N_2O$ 排放量却正好完全相反。Okuda 等[15] 在日本采用静态箱法对地膜覆盖的果园土壤 $N_2O$ 的排放研究中也发现同样的现象。

由此，我们分析，在这两种栽培管理下，温度和土壤水分的差异可能不是影响土壤 $N_2O$ 差异最主要的影响因子，最主要的原因可能与这两种栽培管理中施肥方式不同有关。许多研究[7,31] 也认为，农田施肥是促进土壤 $N_2O$ 排放量的主要影响因子。在本实验中，膜下滴灌施肥采用的方式是滴灌施肥，即将肥料溶在滴灌肥料罐中，然后随滴灌水施到植株的根区土壤中。这种施肥方式可以使植物更加充分地吸收利用肥料，减少残留在土壤中氮的含量，降低了土壤硝化和反硝化作用需要的氮源[31]，从而降低土壤 $N_2O$ 排放量。传统的无膜漫灌施肥方式是撒施，即在灌溉前将肥料撒施到土壤中，然后灌溉使肥料随水进入土体供作物吸收利用。这种传统的施肥方式降低了肥料的利用率，尤其是在植物行间土壤中，滞留大量的氮肥，并不能被植物充分利用，最终导致残留氮肥经过硝化和反硝化作用，释放大量的 $N_2O$ 于大气中。

其次，膜下滴灌栽培土壤 $N_2O$ 排放量较少可能与土壤表面的地膜阻隔作用有关。土壤表面被一层不透气的地膜覆盖后，在一定程度上可以阻隔或减缓土壤气体 $N_2O$ 向大气的扩散和释放，加之地膜覆盖可以使膜下土壤局部产生厌氧状态[32]，更加剧了土壤的反硝化作用，使滞留在土壤中的 $N_2O$ 在厌氧微生物的作用下更有机会进一步转化为 $N_2$[30,33]，从而降低土壤 $N_2O$ 的产生。

总体而言，温度和土壤水分是旱地农田土壤 $N_2O$ 排放的主要影响因子，但相对于施肥管理而言，其影响程度较小，肥料效应足以掩盖温度和水分对土壤 $N_2O$ 的影响。因此，对于我国旱田温室气体减排措施制定中，应该加强对肥料的管理。

## 4　结论与展望

本试验通过无膜漫灌和膜下滴灌对棉田土壤地表 $CH_4$ 和 $N_2O$ 通量的研究发现，不同管理措施对土壤 $CH_4$ 和 $N_2O$ 通量的影响较大。无膜漫灌土壤 $CH_4$ 通量日变化和季节变化呈吸收状态，而膜下滴灌管理措施改变了旱田生态系统与大气甲烷的交换方向，呈现排放状态。膜下滴灌和无膜漫灌两种

栽培管理措施下土壤 $N_2O$ 通量日变化和季节变化规律相似,均呈单峰曲线,但是,膜下滴灌在整个生长季节降低了 $N_2O$ 的排放量。关于干旱区膜下滴灌棉田土壤其他温室气体排放通量与温室效应以及驱动机理有待进一步的研究。

## 参 考 文 献


[1] IPCC (International Panel On Climate Change). The physical science basis. // Solomon S, Qin D, Manning M et al. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007

[2] Liu C Y, Holst J, Bruggemann N, et al. Effects of irrigation on nitrous oxide, methane and carbon dioxide fluxes in an inner Mongolian steppe. Adv Atmos Sci, 2008, 25(5): 748—756

[3] Semenov M V, Kravchenko I K, Semenov V M. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide fluxes in soil catena across the right bank of the Oka river (Moscow Oblast). Eurasian Soil Sci, 2010, 43: 541—549

[4] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W, et al. The potential importance of grazing to the fluxes of carbon dioxide and methane in an alpine wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau. Atmos Environ, 2005, 39(29): 5 255—5 259

[5] Kessavalou A, Mosier A R, Doran J W, et al. Fluxes of $CO_2$, $N_2O$ and $CH_4$ in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. J Environ Qual, 1998, 127: 1 094—1 104

[6] 白小琳, 张海林, 陈阜, 等. 耕作措施对双季稻田 $CH_4$ 与 $N_2O$ 排放的影响. 农业工程学报, 2010, 26(1): 282—289. Bai X L, Zhang H L, Chen F, et al. Tilliage effects on $CH_4$ and $N_2O$ emission from double cropping paddy field (In Chinese). Transactions CASE, 2010, 26(1): 282—289

[7] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2 166—2 172. Dai G Z, LI C F, Cao C G, et al. Effects of no-tillage and fertilization on paddy soil $CH_4$ and $N_2O$ emissions and their greenhouse effect in Central China (In Chinese). Chinese J Appl Ecolo, 2009, 20(9): 2 166—2 172

[8] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 环境因素和作物生长对稻田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响. 农业环境科学学报, 2003. 22(6): 711—714. Jiang J Y, Huang Y, Zong L G. Influence of environmental factors and crop-growing on emissions of $CH_4$ and $N_2O$ from rice Paddy (In Chinese). J Agro-Environ Sci, 2003, 22(6): 711—714

[9] Yin X H, Seavert C, Tomasini N. Impacts of double-line drip irrigation and straw mulching on sweet cherry water use and productivity. Hortscience, 2008. 43(4): 1 164—1 165

[10] Haraguchi T, Marui A, Mori K, et al. Movement of water collected by vegetables in plastic-mulching field. J Fac Agr Kyushu U, 2003, 48(1/2): 237—245

[11] 胡明芳, 田长彦. 新疆棉田地膜覆盖耕层土壤温度效应研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 128—130. Hu M F, Tian C Y. The temperature effects of membrane coverage on cultivated soil of cotton field in Xinjiang (In Chinese). Chinese J Eco-Agri, 2003, 11(3): 128—130

[12] Moreno M M, Moreno A. Effect of different biodegradable and polyethylene mulches on soil properties and production in a tomato crop. Sci Hortic, 2008, 116(3): 256—263

[13] Zhang Z C, Zhang S F, Yang J C, et al. Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation. Field Crop Res, 2008, 108(1): 71—81

[14] 何文清, 严昌荣, 赵彩. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 533—538. He W Q, Yan C R, Zhao C. Study on the pollution by plastic mulch film and its countermeasure in China (In Chinese). Journal of Agro-environment Science, 2009, 28(3): 533—538

[15] Okuda H, Noda K, Sawamoto T, et al. Emission of $N_2O$ and $CO_2$ and uptake of $CH_4$ in soil from a *Satsuma mandarin* orchard under mulching cultivation in central Japan. J Jpn Soc Hortic Sci, 2007, 76(4): 279—287

[16] 朱咏莉, 吴金水, 韩建刚. 地膜覆盖对土壤中 $N_2O$ 释放的影响. 农业工程学报, 2004, 20(3): 232—235. Zhu Y L, Wu J S, Han J G. Effects of clear plastic film mulching on soil $N_2O$ discharge flux (In Chinese). Transactions CSAE, 2004, 20(3): 232—235

[17] Xie J X, Li Y, Zhai C X, et al. $CO_2$ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. Environ Geol, 2009, 56: 953—961

[18] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 等. 内蒙古羊草草原不同物候期 $CH_4$ 通量日变化特征与日通量比较. 地理研究, 2004, 23(6): 785—794. Qi Y C, Dong Y S, Geng Y B, et al. The comparison of the $CH_4$ flux diurnal variation characteristics and diurnal uptake flux in different phenologies in *Leymus Chinense* grassland in Inner Mongolia, China (In Chinese). Geogr Res, 2004, 23(6): 785—794

[19] 李琳, 张海林, 陈阜, 等. 不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2 765—2 770. Li L, Zhang H L, Chen F, et al. $CO_2$ flux and its correlation with soil temperature in winter wheat growth season under different tillage measures (In Chinese). Chinese J Appl Ecolo, 2007, 18(12): 2 765—2 770

[20] Win K T, Nonaka R, Toyota K, et al. Effects of option mitigating ammonia volatilization on $CH_4$ and $N_2O$ emissions from a paddy field fertilized with anaerobically digested cattle slurry. Biol Fert Soils, 2010, 46(6): 589—595

[21] Xu Y C, Shen Q R, Li M L, et al. Effect of soil water status and mulching on $N_2O$ and $CH_4$ emission from lowland rice field in China. Biol Fert Soils, 2004, 39(3): 215—217

[22] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮排放研究. 应用生态学报, 2005. 16(3): 539—544. Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, et al. $CH_4$ and $N_2O$ emission from a winter-time flooded paddy field in a hilly area of Southwest China (In Chinese). Chinese J Appl Ecol, 2005, 16(3): 539—544

[23] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区 2 种土地利用方式下

地表 $CH_4$ 和 $N_2O$ 通量研究. 热带亚热带植物学报, 2008. 16(4): 304—314. Liu H, Zhao P, Lin Y B, et al. $CH_4$, and $N_2O$ fluxes from soil surface of 2 land use in a hilly area of south China (In Chinese). J Trop Subtrop Bot, 2008, 16(4): 304—314

[24] 梁巍, 张颖, 岳进, 等. 长效氮肥施用对黑土水旱田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响. 生态学杂志, 2004, 23(3): 44—48. Liang W, Zhang Y, Yue J, et al. Effect of slow-releasing nitrogen fertilizers on $CH_4$ and $N_2O$ emission in maize and rice fields in black earth soil (In Chinese). Chinese J Ecol, 2004, 23(3): 44—48

[25] 徐华, 蔡祖聪, 八木一行. 水稻土甲烷产生、氧化和排放过程的相互影响——以水分历史处理为例. 土壤, 2006, 38(6): 671—675. Xu H, Cai Z C, Kazuyuki Y. Interactions among $CH_4$ production, oxidation and emission in paddy soil—A case study of soils with different water history (In Chinese). Soils, 2006, 38(6): 671—675

[26] 刘惠, 赵平. 华南丘陵区针叶林和果园地表 $CH_4$ 通量的日变化. 生态环境, 2008, 17(3): 1 112—1 115. Liu H, Zhao P. Diurnal variations of $CH_4$ fluxes from soil surface of plantation and orchard in a hilly area of south China (In Chinese). Ecology Environment, 2008, 17(3): 1 112—1 115

[27] Seneviratne G, van Holm L H J. $CO_2$, $CH_4$ and $N_2O$ emissions from a wetted tropical upland soil following surface mulch application. Soil Biol Biochem, 1998, 30(12): 1 619—1 622

[28] Mosier A, Sehimel D, Valefltine D, et al. Methane and nitrous oxide fluxes innative, fertilized and cultivated grasslands. Nature, 1991, 350: 330—332

[29] Gulledge J, Schimel J P. Moisture control over atmospheric $CH_4$ consumption and $CO_2$ production in diverse Alaskan soils. Soil Biol Biochem, 1998, 30(8/9): 1 127—1 132

[30] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 控制灌溉对稻田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 合排放及温室效应的影响. 水科学进展, 2010, 21(2): 235—241. Peng S Z, Yang S H, Xu J Z. Influence of controlled irrigation on $CH_4$ and $N_2O$ emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect (In Chinese). Adv Water Sci, 2010, 21(2): 235—241

[31] 钟文辉, 蔡祖聪, 尹力初, 等. 种植水稻和长期施用无机肥对红壤氨氧化细菌多样性和硝化作用的影响. 土壤学报, 2008, 45(1): 105—111. Zhong W H, Cai Z C, Yin L C, et al. Effects of rice cultivation and long-term application of inorganic fertilizers on ammonium oxidizers diversity and nitrification of red soils (In Chinese). Acta pedologica Sinica, 2008, 45(1): 105—111

[32] 周劲松, 膜覆盖对土壤理化性状的影响. 青海大学学报, 1996, 14(2): 60—64. Zhou J S. The effects of plastic cover used on the physicochemical properties of soil (In Chinese). J Qinghai Univ, 1996, 14(2): 60—64

[33] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 $N_2O$ 排放的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 840—844. Wang G L, Hao M D, Chen D L. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization on denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil (In Chinese). Plant Nutr Fert Sci, 2006, 12(6): 840—844

# $CH_4$ AND $N_2O$ FLUXES FROM COTTON FIELDS DIFFERENT IN FARMING PRACTICES IN NORTHWESTERN CHINA

Li Zhiguo[1,2]　Zhang Runhua[3]　Lai Dongmei[1]　Yan Zhengyue[4]　Tian Changyan[1†]

(1 *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Fukang Station of Desert Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*)

(2 *Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430074, *China*)

(3 *Wuhan vegetable research institute, Wuhan* 430065, *China*)

(4 *Fangchenggang Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Fangchenggang, Guangxi* 538001, *China*)

**Abstract** Currently, limited information is available regarding the effects of different farmland management practices on fluxes of methane ($CH_4$) and nitrous oxide ($N_2O$) from the fields. In this study, diurnal and seasonal variations of $CH_4$ and $N_2O$ fluxes from fields under different farming practices, i. e. nowadays commonly used mulched drip irrigation (MD) and traditional mulch-free flood-irrigation (MFF), were monitored with closed static chambers and a modified gas chromatograph (HP4890). This study was conducted in a cotton field in Xinjiang, Northwestern China. Results show that the diurnal variations of $CH_4$ in treatments MFF and MD were in sharp contrast. In the former $CH_4$ flux descended first and then ascended, while in the latter it proceeded reversely. Over the whole cotton growing season, however, it had no clear pattern to follow. The soil in the former absorbed a total of $CH_4$ 0.7 ~ 23.1 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$ from the atmosphere, while the soil in the latter released a total of $CH_4$ 45.2 ~ 52.5 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$. As for $N_2O$ fluxes, the two treatments exhibited similar diurnal and seasonal patterns of a curve going up first and down later. However, in treatment MFF daily $N_2O$ flux was much

higher than in treatment MD. Over the whole cotton growing season, the total $N_2O$ emission was higher in treatment MFF ($N_2O$ 99.3 ~ 320.0 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$) than in treatment MD ($N_2O$ 60.0 ~ 259.0 mg $m^{-2}$ $a^{-1}$). All the findings suggest that the MD system could alter the direction of the $CH_4$ flux between the soil and the atmosphere of field agro-ecosystem in the arid region. It enhanced considerably $CH_4$ emission, but did not affect much the diurnal or seasonal variation of $N_2O$ fluxes, however, it did reduce $N_2O$ emission from the soil quite significantly.

**Key words** Mulched drip-irrigation; Mulch-free flood-irrigation; Farmland management practices; $CH_4$; $N_2O$; Closed static chamber