

文章编号: 1000-2022(2006)02-0181-08

华北平原冬麦田土壤 CH_4 的吸收特征研究张雪松^{1,2}, 申双和¹, 李俊³, 于强³

(1. 南京信息工程大学应用气象学系, 江苏南京 210044

2. 铁岭市气象台, 辽宁铁岭 112000 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 利用静态箱/气相色谱 (GC) 法, 对华北平原冬小麦拔节—成熟期间麦田土壤 CH_4 气体通量进行了测定, 得出华北平原典型冬麦田土壤是大气 CH_4 的弱吸收汇。试验期间土壤 CH_4 通量存在明显的季节变化和日变化, 麦田拔节—成熟期间土壤 CH_4 通量日平均值为 $-18.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 波动范围为 $-4.3 \sim -24.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 在土壤 CH_4 通量的日变化中, 观测到麦田土壤在午间和夜间都有一个吸收峰, 峰值出现的时间因生育期不同而有所不同。试验期间 CH_4 通量日平均值与土壤温度关系不明显, 而与土壤水分呈负相关 ($\alpha=0.01$); 日变化中土壤 CH_4 通量与地表温度的相关性较差, 而与 5 cm 地温相关密切。麦田拔节—成熟期间土壤 CH_4 通量日平均值随 NH_4^+-N 施用量的增加呈递减规律, 农田秸秆还田后不利于土壤对 CH_4 的吸收。

关键词: 华北平原; 冬麦田; 静态箱/气相色谱 (GC) 分析; 土壤 CH_4 通量

中图分类号: S181 **文献标识码:** A

Soil CH_4 Uptake in Winter Wheat Field
in the North China PlainZHANG Xue-song^{1,2}, SHEN Shuang-he¹, LI Jun³, YU Qiang³

(1. Department of Applied Meteorology, NUIST, Nanjing 210044 China 2. Tieling Weather Bureau Tieling 112000, China

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research CAS Beijing 100101, China)

Abstract Experimental studies were conducted at the Yucheng Comprehensive Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences during the period from March to June in 2003. Respiration of a pulverous sandstone soil was studied under cultivation of winter wheat over a growth season. Soil CH_4 was measured by the Static-Chamber method combined with the Gas Chromatography (GC) technique. Results indicated that the soil of winter wheat field in the rapid growth season is a weak sink of CH_4 . Uptake of CH_4 by the soil showed an obvious seasonal and diurnal variations in this period of time. The mean value of CH_4 fluxes was $-18.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and the range from -4.3 to $-24.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. There were two peaks at day and night time respectively and the time of peaks varied with the change of wheat growth. The relationship between daily mean soil CH_4 flux and soil temperature was not remarkable, but a

收稿日期: 2004-09-16 改回日期: 2005-04-04

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G2002CB412501); 国家海外杰出青年合作研究项目 (40328001); 中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”资助 (KZCX1-SW-01)

作者简介: 张雪松 (1975-), 女, 辽宁铁岭人, 硕士生, 研究方向: 农业气象、生态环境气象. E-mail: hltzx@sohu.com.

closely negative correlation was found between soil CH_4 fluxes and soil moisture ($\alpha = 0.01$); and the diurnal soil CH_4 flux was also closely related to temperature not of the soil surface but of 5 cm depth. Soil CH_4 fluxes would reduce with increase of NH_4^+ concentration, and Straw's retention went against soil oxidation of CH_4 .

Key words North China Plain winter wheat field Static-Chamber method combined with the Gas Chromatography (GC) technique; soil CH_4 uptake

0 引言

CH_4 是大气中含量最高的痕量有机气体, 它对增强温室效应的贡献仅次于 CO_2 。目前, 由于大气中 CH_4 的产生和消耗能力之间的不平衡, CH_4 的浓度正以每年 1% 的速度持续增加^[1]。土壤中 CH_4 的产生和氧化过程是全球碳循环的重要组成部分, 研究农田土壤对大气 CH_4 的氧化吸收, 减轻人类活动对土壤 CH_4 吸收的负面影响, 对减缓气候变暖有深远意义。已经证实 CH_4 在土壤中被氧化吸收与土壤中生物媒介的氧化反应有关^[2-8], 是土壤中参与氧化 CH_4 有关的微生物“ CH_4 氧化菌”发挥活性的过程。因试验条件不同, CH_4 在土壤中被氧化吸收的通量与土壤质地^[2-9,15]、温度^[16-18]、pH 值^[17-19,26] 的关系并不确定, 但高土壤水分^[27-28]、施肥^[29-34]、低 C/N 作物秸秆为原料的肥料^[35] 等都是限制 CH_4 氧化菌发挥活性的影响因素。

目前对地—气生态系统中 CH_4 源或汇及其与影响因素的关系的研究, 涉及到旱作农田的比较少。本文通过对华北平原典型冬小麦田土壤 CH_4 通量及相关环境要素的定位观测, 试图阐明华北冬小麦拔节—成熟期间土壤 CH_4 通量的季节变化和日变化特征, 寻求土壤 CH_4 净通量与气象、环境因子的关系, 以及人类活动 (主要是施肥) 对农田生态系统 CH_4 源、汇强度和过程的影响, 并为华北典型农田生态系统 CH_4 排放和吸收总量的估算提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验点概况

观测点设在中国科学院禹城综合试验站 (116°38'E, 36°56'N, 海拔 50.1 m), 该站属暖温带半湿润半干旱季风气候, 平均年降水量 610 mm, 降水主要集中在 6—8 月, 占年降水总量的 68.8%; 年平均气温 13.1℃; 旱作农田土壤质地以粉砂、轻壤为主, 表层土壤 pH 值较高, 为 7.9~8.0 土壤有机质含量较低, 为 0.6%~1.0%; 全 N 含量为

0.05%~0.65%。当地种植制度以冬小麦—夏玉米轮作为主。从自然条件看, 该站在华北平原具有代表性。

1.2 试验设计及田间管理

试验于 2003 年 3—6 月在冬小麦田进行, 分大田和 N 肥小区试验。试验设计方案如下:

(1) 冬小麦大田分玉米秸秆还田和秸秆离田 2 个处理, 各 3 个重复; 2002 年 10 月 17 日播种, 品种为 D9401。2002 年 10 月 15 日施底肥硫酸钾复合肥, 施用量为 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $m_N : m_P : m_K = 12 : 15 : 10$; 用于还田的玉米秸秆被直接粉碎后翻入土壤, 秸秆投放量为 $7500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 投放日期为 2002 年 10 月 2 日。

(2) 在冬小麦 N 肥小区设 N_0 、 N_{100} 、 N_{200} 、 N_{300} 4 个处理, 分别代表施用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 后, 土壤纯氮含量为 0、100、200、300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2002 年 10 月 11 日播种, 品种为兰考 906 小麦 N 肥小区在播前 (基肥)、返青—拔节和扬花 3 个时期结合灌水等量施肥, 灌水方式为 FC (田间持水量) 保持土壤水分为 50%~60%, 一旦土壤水分降低到 50% FC 时, 通过灌水使其恢复到高限 60% FC; 通量观测设 2 个重复。

通量观测采用静态箱/气相色谱 (GC) 法: 田间气体样品由人工手动采集, 采样箱由不锈钢制成, 顶箱 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$, 外罩隔热棉被, 箱内装有 2 个轴流风扇、采样管和测温探头。底座 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 于播种前埋入土壤 20 cm, 并设有密封水槽, 观测时将顶箱扣于底座上, 加水密封, 分别在扣箱后 0、10、20、30 min 用 100 ml 注射器抽取箱内气体, 密封保存后送至实验室, 取样当天用气相色谱仪 (Gas Chromatography-GC) 分析 CH_4 浓度。本实验采用 Agilent4890D 型气相色谱仪分析气样, 配备 2070AA 色谱工作站, 色谱柱配置为 Col: SS, 材料为不锈钢, 柱长 2 m, 内径 2 mm, 内填数目为 60/80 的 13X 分子筛, 柱箱温度 55℃, 检测器 (FID) 温度 200℃, 载气为高纯氮气, 流速 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 氢气为氢焰离子 (FID) 燃烧气, 流速 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 空气为 FID 助燃气, 流速 $350 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[36]。同步测定

箱内、外气温、地表温度和地下 5 cm 温度,并用中子仪测量土壤水分。冬小麦大田 3 月每周采样 1 次,4—6 月每周采样 2 次,冬小麦 N 肥小区试验每周采样 1 次,采样时间均为上午 09:00—11:00 之间。在冬小麦大田 4、5 月各进行一次日变化观测,从当日上午 09:00 开始到次日上午 09:00 结束,白天隔 2 h 测定一次,夜间隔 3 h 测定一次。

1.3 土壤 CH₄ 通量计算原理

静态箱法测定土壤气体通量的计算公式如下:

$$F = \frac{M}{V_0} \times \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dc}{dt} \times h_0 \tag{1}$$

式中: F 为土壤气体通量 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); M 为 CH_4 的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$); V_0 为标准状态 (温度 273 K, 气压 1 013 hPa) 下气体的摩尔体积 ($22.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3$); T_0 和 p_0 分别为标准状态下的空气绝对温度 (K) 和气压 (hPa); p 为采样点气压 (hPa); T 为采样时的绝对温度 (K); dc/dt 为观测时间内箱内 CH_4 浓度随时间变化的直线斜率,正值表示排放,负值表示吸收; c 为 t 时刻箱内被测气体的体积分数 (1×10^{-6}); t 为时间 (min); h 为有效箱高 (cm)。

2 结果与分析

2.1 华北平原典型冬麦田土壤 CH₄ 通量特征

2.1.1 土壤 CH₄ 通量季节变化

观测结果表明,冬麦田在返青—成熟的整个生育期是大气 CH_4 净吸收汇,土壤 CH_4 通量日平均值为 $-18.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,最大通量为 $-24.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,最小仅为 $-4.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 1a 负值代表吸收)。麦田土壤 CH_4 通量在试验期间表现出明显的吸收峰,第 1 个峰值期出现在 4 月 3 日前后的小麦拔节期,此时春季回暖迅速,无明显降水,土壤底墒低 (图 1b—c),干燥透气的土壤环境有利于 CH_4 氧化菌发挥活性,土壤表现出吸收 CH_4 的特性。第 2 个峰值期出现在 5 月 6—14 日小麦开花期,此时通量变化对水分的响应很敏感,如 5 月 7 日全天小雨,降水量 8 mm,使 5 月 9 日的通量观测值明显表现了吸收劣势。4 月 16—17 日,禹城市遭遇特大暴雨,24 h 降水量 133 mm,强降水大部分以地表径流的形式流走,未能明显提高土壤深层含水量,但由于参与 CH_4 氧化的菌群主要活动在表土 (0~10 cm)^[37],暴雨使麦田表层土壤含水量骤增甚至淹水,限制了 CH_4 氧化菌的活动,使土壤氧化吸收 CH_4 的能力下降。所以,从麦田土壤 CH_4 通量的季节变

化可见,华北平原典型冬麦田土壤对大气 CH_4 大气的氧化吸收与外界气象条件和土壤特性可能存在一定的相关关系 (将在 2.2 节中加以考查)。

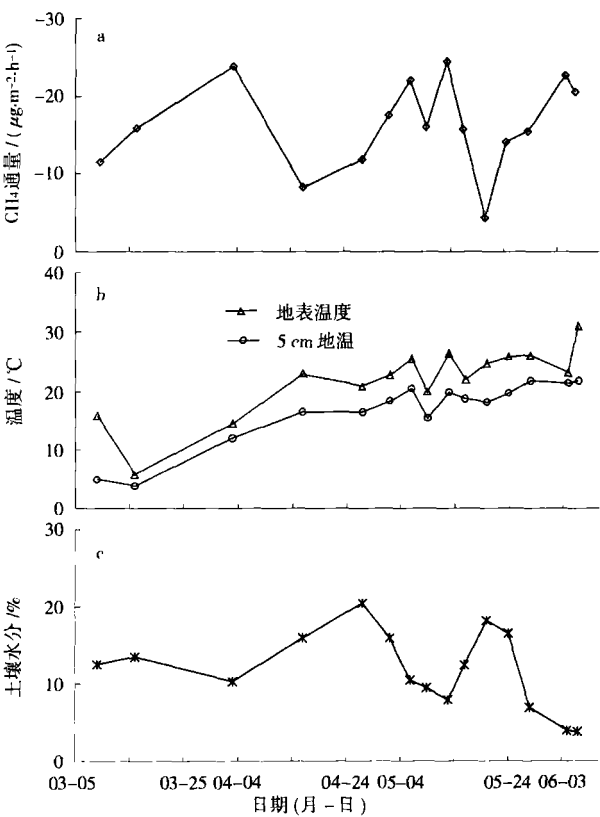


图 1 土壤 CH₄ 通量 (a)、地温 (b)、0~10 cm 土壤水分 (c) 的季节变化

Fig 1 Seasonal variations of soil CH₄ flux (a), ground surface temperature (b) and soil moisture in the layer of 0–10 cm (c)

2.1.2 土壤 CH₄ 通量日变化

麦田土壤 CH_4 通量具有明显的日变化 (图 2)。日出以后,土壤对 CH_4 的吸收逐渐增大,11:00—13:00 达到最大,随后又逐渐减弱,17:00—19:00 最小,此后吸收再次增强。由图 2 还可以看出,白天土壤对 CH_4 的吸收峰与土壤最高温度出现的时间一致,说明白天气温的变化对土壤 CH_4 通量的影响非常重要,温度升高有利于土壤对 CH_4 的吸收,夜间吸收峰与环境条件的关系将在 2.2.3 中说明。

比较图 2a 与图 2b 可知,土壤 CH_4 通量的日变化形式在作物不同发育时期并不完全相同,通量最大吸收值出现的时间和吸收强度都存在差异,且在 5 月 20—21 日早晨 06 时、07 时出现土壤向大气释放 CH_4 的情况,是一个 CH_4 的弱源,这与王跃思等^[38]观测的半干旱草甸草原地—气温温室气体 CH_4 交换速率日变化结果类似。

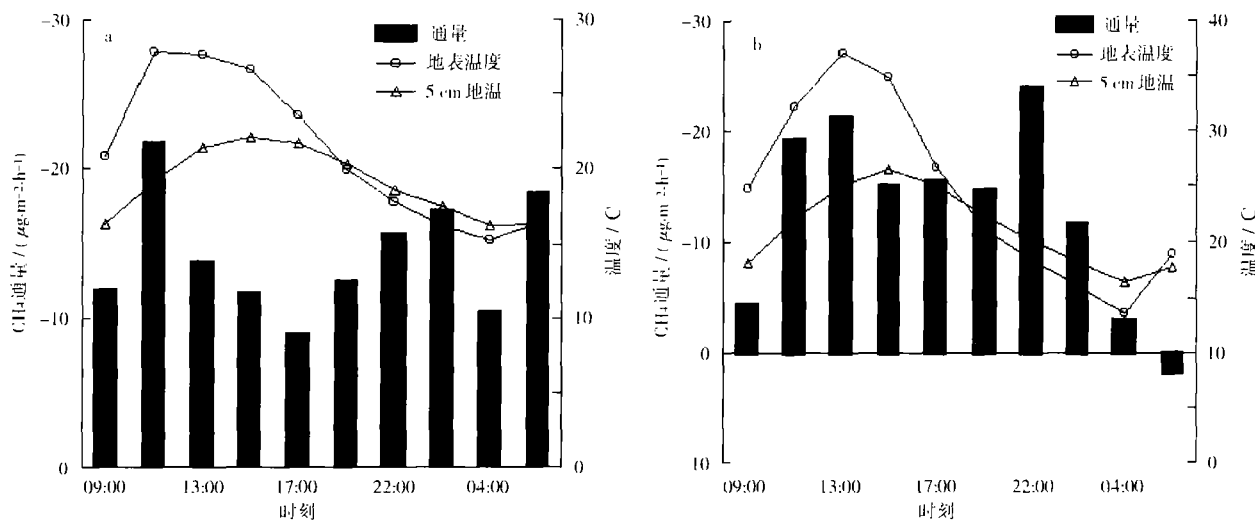


图 2 2003 年 4 月 27—28 日 (a) 和 5 月 20—21 日 (b) 土壤 CH₄ 通量与地温的日变化

Fig 2 Diurnal variations of soil CH₄ flux, ground surface temperature and 5 cm soil temperature on 27th to 28th April (a) and 20th to 21th May (b) 2003

2.2 土壤温度、水分对麦田土壤 CH₄ 通量的影响

2.2.1 土壤温度对麦田土壤 CH₄ 通量的影响

本试验期间观测结果表明, 冬麦田土壤 CH₄ 通量日平均值与气温之间的关系不明显 (图略)。分析一天内土壤 CH₄ 通量与温度的关系, 得出土壤 CH₄ 通量与地表温度的相关性较差, 而与 5 cm 地温相关密切 (图 3), 相关系数分别为

4 月 27—28 日: $r = 0.6641 (\alpha = 0.05)$;

5 月 20—21 日: $r = 0.8099 (\alpha = 0.01)$ 。

Schütz 等^[39]发现, 不同时期 CH₄ 排放日变化与稳定的深层土壤温度有较好的正相关, 然而与 CH₄

排放率相关的温度却发生在不同的深度。另外, CH₄ 排放率的季节变化与土壤温度相关性较差或没有明显相关, 这与本试验的结果一致。

从图 3 中还可以看出, 土壤 CH₄ 通量的吸收似乎存在一个最适温度, 且随植物生育时期不同而不同。如 4 月 27—28 日, 最适温度为 19.1 °C, 而 5 月 20—21 日, 最适温度上升为 20.1 °C。当然, 由于观测次数不多, 这种现象还有待进一步证实。

温度之所以对土壤微生物活性和土壤中 CH₄ 通量产生重要影响, 主要是它能够制约有机质的分解、调节参与 CH₄ 生化反应的微生物活性, 同时对 CH₄

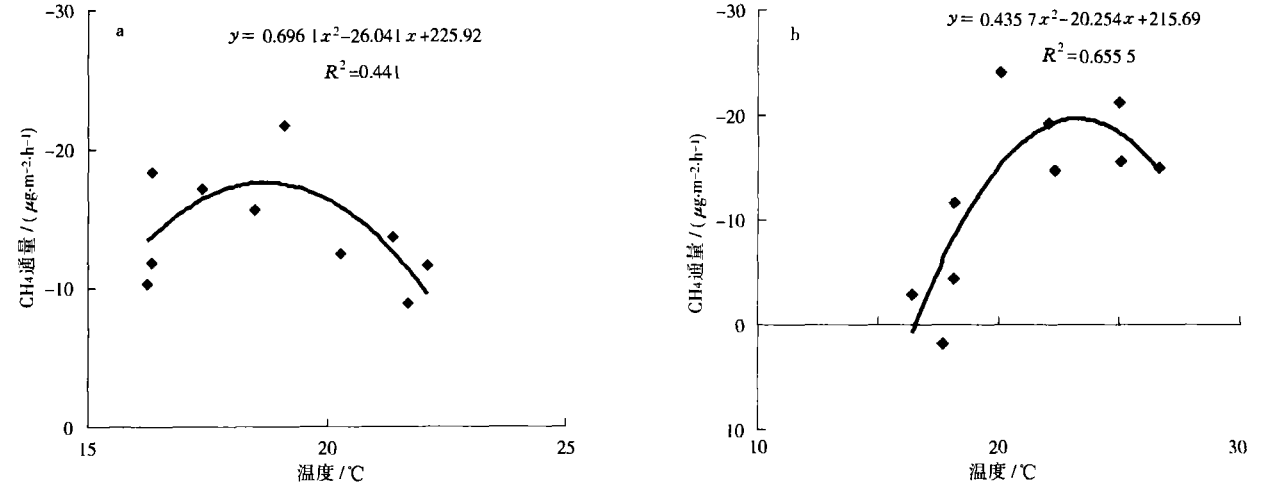


图 3 2003 年 4 月 27—28 日 (a) 和 5 月 20—21 日 (b) CH₄ 日变化通量与 5 cm 地温的相关关系

Fig 3 Relationship between the diurnal variation of CH₄ flux and the soil temperature at the depth of 5 cm on 27th to 28th April (a) and 20th to 21th May (b) 2003

的再氧化起着至关重要的作用。由于影响 CH₄ 吸收及氧化的因素比较复杂, 也许某些限制因素产生后, 即使提高温度 CH₄ 也不会再被土壤氧化, 再者, 不同深层土壤温度对土壤不同微生物的影响不同, 进而会影响到土壤中有机质分解产物的不同, 这使得土壤温度对通量的影响具有多样性。

2 2 2 土壤水分对麦田土壤 CH₄ 通量的影响

土壤含水量对土壤生产和吸收 CH₄ 的影响主要通过影响土壤通气状况, 进而影响氧气的有效性和土壤中 CH₄ 在土壤与大气中的交换。因此, 适当增加土壤水分含量可以减少微生物的水分胁迫, 有利于 CH₄ 氧化菌发挥活性, 提高土壤吸收 CH₄ 的能力。但另一方面由于水分含量增加后, CH₄ 扩散受到限制, 因而又会抑制 CH₄ 氧化。本试验期间土壤的 CH₄ 通量与 0~10 cm 土壤水分含量之间的相关关系如图 4 所示, 土壤 CH₄ 吸收通量与土壤水分呈负相关 ($\alpha = 0.01$), 即土壤水分越高, 则土壤对 CH₄ 吸收越弱; 反之, 吸收加强。因此, 对华北平原冬麦田而言, 土壤水分偏少有利于土壤对大气 CH₄ 的吸收。图 4 所示的关系与蔡祖聪等^[40] 对我国半干旱草地土壤中 CH₄ 氧化量与水分含量呈负相关的研究结论接近。

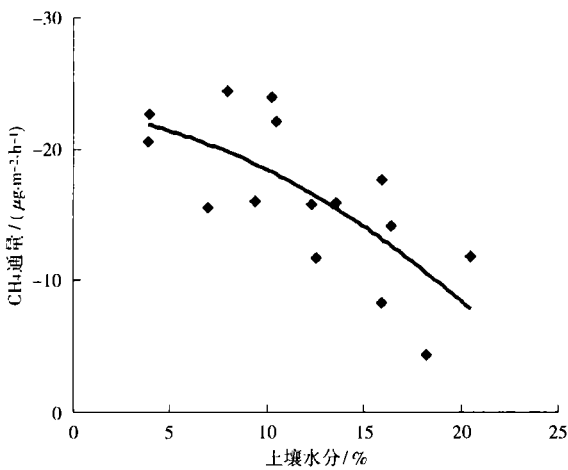


图 4 CH₄ 通量与 0~10 cm 土壤水分的相关关系

Fig 4 Relationship between CH₄ fluxes and soil moisture in the layer of 0-10 cm

2 2 3 土壤温度和水分对麦田土壤 CH₄ 通量的交互影响

综合本试验观测结果可以看出, 在整个小麦生长旺季, 土壤温度对土壤 CH₄ 通量的影响明显小于土壤水分的影响, 而在土壤 CH₄ 通量的日变化观测中土壤温度对通量有明显影响, 可以认为土壤温度

和水分对麦田土壤 CH₄ 通量存在交互影响。在通量日变化观测中, 由于一天中土壤水分的变动范围相对稳定, 土壤水分含量对 CH₄ 通量的影响不明显, 而日变幅较大的土壤温度对土壤 CH₄ 的氧化作用表现出来。当土壤温度较低时, 土壤中包括 CH₄ 氧化菌酶在内的所有微生物的活性都较弱, 大气 CH₄ 和 O₂ 扩散进入土壤的速率高于 CH₄ 氧化菌对 CH₄ 和 O₂ 的消耗速率, 因而土壤 CH₄ 通量较小。随着温度的升高, 土壤 CH₄ 氧化菌和其他微生物的活性提高, 土壤 CH₄ 氧化通量也随之增大, 当温度进一步升高时, CH₄ 和 O₂ 的扩散速率小于 CH₄ 氧化菌对 CH₄ 和 O₂ 的消耗速率, 土壤温度从而又成为限制土壤氧化 CH₄ 的因子。此外, 土壤中硝化菌等微生物的生存和竞争利用 O₂ 的能力强于 CH₄ 氧化菌^[41], 导致 CH₄ 氧化菌的 O₂ 供给处于不饱和状态, CH₄ 氧化菌活性和功能无法完全发挥, 并且会限制 CH₄ 氧化菌自身的繁殖, 导致 CH₄ 氧化菌数量减少, 进而降低土壤对大气 CH₄ 的氧化吸收。所以在土壤 CH₄ 通量的日变化中, 随着温度逐步升高, 土壤中 CH₄ 通量整体呈开口朝下的抛物线特征 (图 3)。当夜间土壤温度较低、土壤中硝化菌等微生物的活性明显减弱时, 由于土壤中 CH₄ 氧化菌较其他菌群对低温具有较高的忍耐力, 在此时充分发挥氧化功能, 因此土壤 CH₄ 通量反而在午夜出现峰值 (图 2)。而由于降水等自然气象条件的影响, 大田中土壤水分在整个小麦生长旺季是变化的, 这样使得土壤水分在土壤 CH₄ 通量的季节变化中成为土壤氧化 CH₄ 的限制因子, 土壤温度对土壤 CH₄ 通量的影响已经被时间平滑, 土壤温度的影响被土壤水分的影响所屏蔽, 这和 Lessard 等^[42] 的研究吻合。

2 3 施肥对麦田土壤 CH₄ 通量的影响

2 3 1 施 N 肥的影响

在 N 肥小区, 水分、温度条件一致的情况下, 观测到麦田土壤季节内 CH₄ 通量日平均值 (所用数据时间为 2002 年 11 月—2003 年 6 月) 随氮肥用量的增加有递减规律:

$$N_0 (-33.7) > N_{100} (-26.4) > N_{200} (-23.2) > N_{300} (-17.7)。$$

可见施 NH₄⁺-N 肥后, 随着 NH₄⁺ 浓度的增加, 土壤氧化 CH₄ 的能力受到限制, 且其限制程度依赖于土壤中 NH₄⁺ 的浓度^[41] (图 5)。这主要是由于 NH₄⁺ 和 CH₄ 具有相似的分子结构, 能够竞争 CH₄ 氧化菌酶系统相同的位点或降低 CH₄ 氧化酶活性, 从而起到抑制 CH₄ 氧化的作用, 产生“酶基质竞

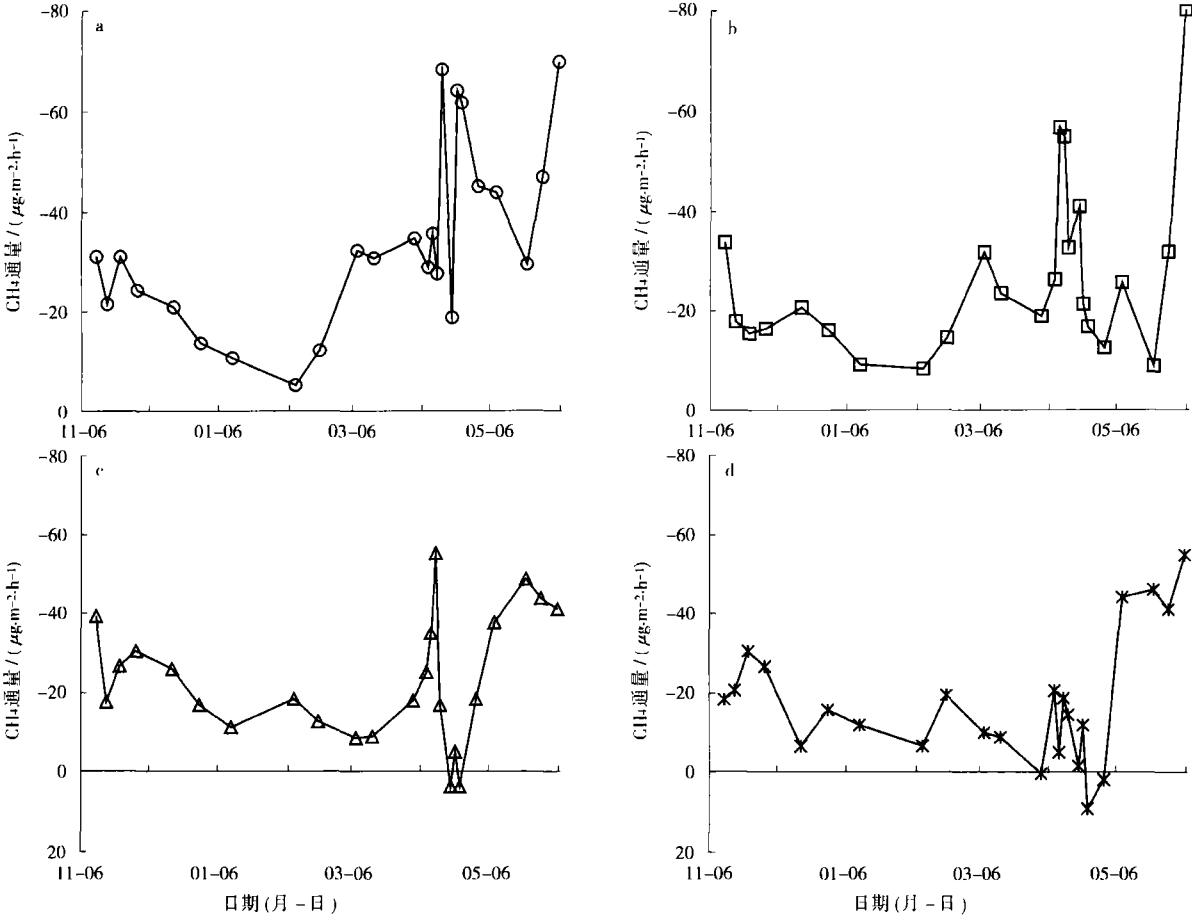


图 5 2002 年 11 月—2003 年 6 月不同 N 肥处理时土壤 CH₄ 通量的季节变化

a N₀ 处理; b N₁₀₀ 处理; c N₂₀₀ 处理; d N₃₀₀ 处理

Fig 5 Seasonal variations of soil CH₄ fluxes in different N treatments in December 2002 to June 2003

a N₀ treatment; b N₁₀₀ treatment; c N₂₀₀ treatment; d N₃₀₀ treatment

争”^[43]。

在 2 月末—3 月初冬小麦返青生长以前, 4 个施 N 水平处理的通量变化规律基本一致, 但通量大小有所差异。在小麦生长季 (从 2003 年 3 月 21 日—2003 年 6 月 7 日) 中每隔 20 d 取土样测定养分含量, 4 月 7 日施追肥。结果表明, 在 4 月 11 日取样测定的土壤 NH₄⁺ 浓度值最大, 对应图 5 中土壤 CH₄ 通量的变化。可以看到当土壤 NH₄⁺ 浓度最高时, 土壤氧化 CH₄ 的能力并非最弱, 实际上土壤中 NH₄⁺ 浓度对土壤氧化 CH₄ 能力的抑制有一个滞后, 这种延迟抑制正是由于 CH₄ 氧化菌被 NH₄⁺-N 硝化菌逐步取代所致, 如果表土的 NH₄⁺ 氧化活动足够高, 以至于阻止 NH₄⁺ 淋失到土壤深层, 施 N 肥对土壤氧化 CH₄ 就不会立即产生作用^[44]。可以认为土壤中高浓度 NH₄⁺ 的施入能够导致与氧化 CH₄ 有关的微生物群的种类、数量减少和活性下降。

2 3 2 有机肥的影响

本试验中用秸秆离田和秸秆还田的对比观测来检验施用有机肥对土壤 CH₄ 通量的影响。结果表明, 在小麦生长旺季, 秸秆离田处理的土壤 CH₄ 季节平均通量为 -33.0 μg·m⁻²·h⁻¹, 强度大于还田土壤 CH₄ 季节平均通量 -18.3 μg·m⁻²·h⁻¹, 说明麦田土壤在秸秆还田后对 CH₄ 的氧化吸收能力下降 (图 6)。秸秆离田土壤 CH₄ 通量的季节变化规律与秸秆还田土壤基本相同, 但通量峰值出现时间存在位相差异, 这与两个处理之间的温度波动和田间土壤的持水能力的差异有关。对秸秆还田和离田两个不同试验处理的土壤 CH₄ 通量做差异显著性分析, 结果表明, 秸秆离田和秸秆还田两个处理之间的差异显著, 从而得出: 农田秸秆还田后不利于土壤对 CH₄ 的吸收, 这与 Hüttsch 等^[30] 的试验结果一致。

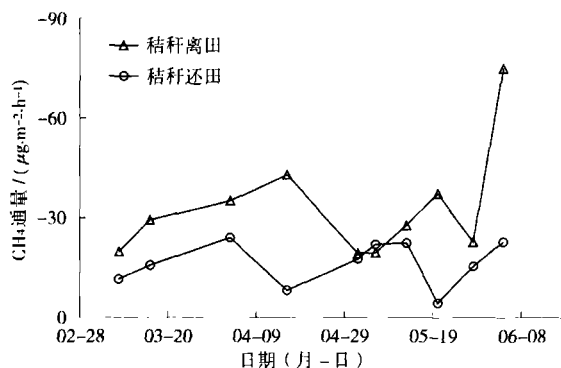


图 6 不同秸秆处理的土壤 CH_4 通量的季节变化

Fig 6 Seasonal variations of soil CH_4 fluxes in different straw treatments

3 结论与讨论

通过对华北平原冬小麦拔节—成熟期间麦田土壤 CH_4 通量的试验观测研究, 得出以下初步结论:

(1) 在冬小麦拔节—成熟期内, 华北平原典型冬麦田土壤是大气 CH_4 的吸收汇。观测期间冬麦田土壤 CH_4 通量有明显的季节变化和日变化。麦田土壤 CH_4 日平均通量平均为 $-18.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 波动范围在 $-4.3 \sim -24.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在小麦拔节期和开花期麦田土壤对 CH_4 表现出明显的吸收。4 月和 5 月的土壤 CH_4 通量日变化均呈双峰曲线, 在午间和夜晚各有一个吸收峰, 峰值出现的时间随小麦生育期不同而有所不同。

(2) 麦田土壤 CH_4 日平均通量与日平均地温相关性不显著, 而与 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 日土壤湿度呈负相关, 并达 0.01 显著性水平。在 4 月和 5 月的日变化观测中, 麦田土壤 CH_4 通量均与 5 cm 地温呈正相关, 并分别达到 0.05 和 0.01 显著性水平; 但土壤 CH_4 通量与地表温度的相关性不显著。

(3) 在小区试验中, 麦田土壤 CH_4 日平均通量随着 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 肥施用量的增加而递减, 这表明土壤氧化 CH_4 的能力与土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度呈反比。

(4) 在大田, 玉米秸秆还田与离田处理的麦田土壤 CH_4 日平均通量平均分别为 -18.3 和 $-33.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 表明秸秆还田不利于麦田土壤对 CH_4 的吸收。

由于本试验采用的静态箱法观测无法避免对田间测量地点及其周围自然条件的扰动, 在一定程度上影响土壤气体通量的交换过程。尽管在田间观测时, 进行扣箱、测量温度等操作的过程中最大程度地减少了人为因素对土壤和植株的影响, 比如在地箱

周围铺垫砖头, 但还是造成了观测区域周围的土壤由于长期践踏而板结, 影响观测结果。

本试验利用静态箱/气相色谱法监测华北农田生态系统碳通量, 试验设计强调定点、长期, 所以试验中每个不同的处理都没有设置对照, 如果同一处理中某次的通量观测值不同重复之间偏差较大, 会对通量结果的最后计算产生影响, 尤其在 N 肥小区试验中, 由于每个处理只有两个重复, 无法估算重复之间的标准误差。

综上所述, 研究地气系统尤其农田中土壤条件对大气温室气体的减排是不断深入的过程, 土壤中微生物在这个过程中起驱动作用, 目前还有许多未知领域需要探索, 有待多种学科相互融合以及大量基础研究工作来共同解决。

参考文献:

- [1] 李玉娥, 林而达. 土壤甲烷吸收汇研究进展 [J]. 地理科学进展, 1999, 14(6): 614-617.
- [2] Wang F L, Bettany J R, Huang P M. Methane uptake by cultivated Canadian prairie and forest soils [J]. Geoderma 1999, 88(1/2): 39-53.
- [3] Hütsch B W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production—invited paper [J]. European Journal of Agronomy 2001, 14(4): 237-260.
- [4] Topp E, Hanson R S. Metabolism of radiatively important trace gases by methane-oxidizing bacteria [C] // Rogers J E, Whitman W B. Microbial Production and Consumption of Green House Gases: Methane, Nitrogen Oxides and Halomethanes. American Society for Microbiology, Washington D C, 1991: 71-90.
- [5] Bose U, Frenzel P. Activity and distribution of methane-oxidizing bacteria in flooded rice soil microcosms and in rice plants (Oryza sativa) [J]. Appl Environ Microbiol 1997, 63: 1199-1207.
- [6] Gilbert B, Frenzel P. Methanotrophic bacteria in the rhizosphere of rice microcosms and their effect on porewater methane concentration and methane emission [J]. Biol Fert Soils 1995, 20(8): 93-100.
- [7] Bender M, Conrad R. Kinetics of CH_4 oxidation in oxic soils exposed to ambient air or high CH_4 mixing ratios [J]. FEMS Microbiol Ecol 1992, 10: 261-270.
- [8] Henckel T, Jöckel U, Schnell S et al. Molecular analyses of novel methanotrophic communities in forest soil that oxidize atmospheric methane [J]. Appl Environ Microbiol 2000, 66: 1801-1808.
- [9] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [J]. Eur J Soil Biol 2001, 37(1): 25-50.
- [10] Garcia J L, Raimbault M, Jacq V, et al. Activités microbiennes dans les sols de rizière du Sénégal: relations avec les propriétés physico-chimiques et influence de la rhizosphère [J]. Ecol Biol Sol 1974, 11(2): 169-185.

- [11] Sass R L, Fisher F M, Lewis S T, et al Methane emissions from ricefields effect of soil properties[J]. *Global Biogeochem Cycles* 1994, 8: 135-140.
- [12] Oades J M. The retention of organic matter in soils[J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 35-70.
- [13] Neue H U, Becker H, Heidmann P, Scharpenseel H W. Organic matter dynamics, soil properties and cultural practices in ricelands and their relationship to methane production[C] // Bouwman A F. *Soils and the Greenhouse Effect*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1990: 457-466.
- [14] Wagner D M, Pfeiffer E M and E, et al Methane production in aerated marshland and model soils: effects of microflora and soil texture[J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, 31(7): 999-1006.
- [15] Joulain C, Escoffier S, Le Mer J et al Populations and potential activities of methanogens and methanotrophs in ricefields relation with soil properties[J]. *Eur J Soil Biol*, 1997, 33(2): 105-116.
- [16] 李玉娥, 林而达. 天然草地利用方式改变对土壤排放 CO_2 和吸收 CH_4 的影响[J]. *农村生态环境*, 2000, 16(2): 14-16, 44.
- [17] Dunfield P, Knowles R, Dumont R, et al Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH[J]. *Soil Biol Biochem*, 1993, 25(3): 321-326.
- [18] Sitaula B K, Bakken L R, Abrahamson G. CH_4 uptake by temperate forest soil: effect of N input and soil acidification[J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27(7): 871-880.
- [19] Hutsch B W, Webster C P, Paulson D S. Methane oxidation as affected by land use, soil pH and nitrogen fertilization[J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, 26(12): 1613-1622.
- [20] Goulding K W T, Willison T W, Webster C P, et al Methane fluxes in aerobic soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1996, 42(1/2): 175-187.
- [21] Shobkol A I, Panikov N S, Zavarzin G A. Microorganism methane oxidation and consumption in tundra and middle taiga bogs[C]. *Microbiology*. New York, 1992, 61: 486-493.
- [22] Sitaula B K, Bakken L R, Abrahamson G. CH_4 uptake by temperate forest soil: Effect of N input and soil acidification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(7): 871-880.
- [23] Dorr H, Katruff L, Levin I. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils[J]. *Chemosphere*, 1993, 26(1/4): 697-713.
- [24] Bender M, Conrad R. Effect of CH_4 concentrations and soil conditions on the induction of CH_4 oxidation activity[J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27(12): 1517-1527.
- [25] Bummel R, Borken W. Site variation in methane oxidation as affected by atmospheric deposition and type of temperate forest ecosystem[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1999, 13(2): 493-501.
- [26] Amaral J A, Ren T, Knowles R. Atmospheric methane consumption by forest soils and extracted bacteria at different pH values[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1998, 64(7): 2397-2402.
- [27] Wang F L, Bettany J R. Methane emission from an usually well-drained prairie soil after snowmelt and precipitation[J]. *Can J Soil Sci*, 1995, 75: 239-241.
- [28] Striegl R G, McConnaughey T A, Thorntenson D C, et al Consumption of atmospheric methane by desert soils[J]. *Nature*, 1992, 357(6374): 145-147.
- [29] Mosier A R, Schimel D S. Influence of agricultural nitrogen on atmospheric methane and nitrous oxide[J]. *Chemistry and Industry*, 1991, 23: 874-877.
- [30] Hutsch B W, Webster C P, Paulson D S. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the Broadbalk wheat experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(10): 1307-1315.
- [31] Willison T W, Webster C P, Goulding K W T, et al Methane oxidation in temperate soils: Effects of land use and the chemical form of nitrogen fertilizer[J]. *Chemosphere*, 1995, 30(3): 539-546.
- [32] 张秀君. 温室气体及其排放的研究[J]. *沈阳教育学院学报*, 1999, 1(2): 103-105, 108.
- [33] Crill P M, Martikainen P J, Nykanen H, et al Temperature and N fertilization effects on methane oxidation in a drained peat land soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(10): 1331-1339.
- [34] 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对土壤氧化大气甲烷影响的机制[J]. *农村生态环境*, 2001, 17(3): 30-34.
- [35] Boeckx P, Van Cleemput O. Methane oxidation in a neutral landfill cover soil: influence of moisture content, temperature, and nitrogen-turnover[J]. *J Environ Qual*, 1996, 25: 178-183.
- [36] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(10): 84-90.
- [37] 纪宝明, 王艳芬, 李香真, 等. 内蒙古锡林河流域主要类型草原土壤中 CH_4 和 CO_2 浓度的变化[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 371-374.
- [38] 王跃思, 纪宝明, 王艳芬, 等. 半干旱草原地气温温室气体交换速率测定[J]. *环境科学*, 2000, 21(3): 7-10.
- [39] Schütz H, Seiler W. Methane flux measurements: Methods and results[C] // Andreae M O, Schimel D S. *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. Wiley, Chichester, 1989: 209-228.
- [40] 蔡祖聪, Mosier A R. 土壤水分状况对 CH_4 氧化、 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. *土壤*, 1999, 6: 289-294, 298.
- [41] Kravchenko Boeckx K, Galchenko V, et al Short-and medium-term effects on CH_4 and N_2O fluxes in arable soils with a different texture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(5): 669-678.
- [42] Lessard R, Rochette P, Topp E. Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites[J]. *Can J Soil Sci*, 1994, 74: 139-146.
- [43] 王智平, 胡春胜, 杨居荣. 无机氮对土壤甲烷氧化作用的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 305-309.
- [44] Conrad R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H_2 , CO , CH_4 , OCs , N_2O and NO) [J]. *Microbiol Rev*, 1996, 60(4): 609-640.