

基于不同监测与估算方法的设施菜田 N₂O 排放量比较

王琛¹, 尹兴², 陈盟³, 韩建¹, 张杰¹, 郭艳杰^{1*}, 张丽娟^{1*}

(1 河北农业大学资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室/河北农业大学邸洪杰土壤与环境实验室, 河北保定 071000; 2 河北经贸大学公共管理学院/河北经贸大学土地资源利用与评价研究所, 河北石家庄 050061; 3 煜环环境科技有限公司, 河北石家庄 050051)

摘要: 【目的】为了分析微气象学方法中反演式气体扩散模型在设施菜田 N₂O 排放测定分析中的应用效果及精确度, 本研究结合静态箱/气相色谱法同步观测结果, 比较了两种观测值之间的差异及其形成的各因素, 以验证该方法在测定温室气体排放中的可行性。【方法】在设施蔬菜大棚中, 设置了施肥区和非施肥区, 通过箱式法和微气象学方法分别对设施菜田种植区进行 72 h 的高频监测和全生长季监测, 构建 N₂O 浓度特征曲线和排放通量特征曲线。【结果】田闲期棚区上方 3.5 m 处 N₂O 浓度明显低于种植期, 但田闲期夜间浓度较高, 种植期白天浓度较高。棚室内 N₂O 浓度随高度增加呈下降趋势, 且差异明显, 而且都高于棚室外背景浓度。静态箱/气相色谱法和反演式气体扩散模型测得棚区 N₂O 日排放特征具有较好的一致性, 但前者测定结果普遍高于后者, 静态箱/气相色谱法测得平均排放通量为 252.51 μg/(m²·h), 反演式气体扩散模型测得平均排放通量为 192.21 μg/(m²·h), 前者比后者高 26.75%; 在设施番茄全生长季观测中, 两种方法测定的 N₂O 排放通量特征曲线趋势一致, 静态箱/气相色谱法测得土壤净排放通量为 1817.49 g/hm², 排放系数为 0.45%; 反演式气体扩散模型测得土壤净排放通量为 1250.95 g/hm², 排放系数为 0.32%, 较静态箱/气相色谱法测得结果降低了 29%。【结论】反演式气体扩散模型、静态箱/气相色谱法对设施菜田种植区 N₂O 排放通量的测定结果, 趋势上一致性较好, 但反演式气体扩散模型观测结果明显低于静态箱/气相色谱法, 不过反演式气体扩散模型自动化程度高, 可以高密监测设施菜田 N₂O 排放全过程, 且适用于较大区域的观测, 为建立多元化的 N₂O 排放监测体系提供了新的研究方法和思路。
关键词: 设施菜田; 静态箱/气相色谱法; 反演式气体扩散模型; 氧化亚氮

Comparison of different monitoring and estimation methods for N₂O emissions from greenhouse vegetables production

WANG Chen¹, YIN Xing², CHEN Meng³, HAN Jian¹, ZHANG Jie¹, GUO Yan-jie^{1*}, ZHANG Li-juan^{1*}

(1 College of Resource and Environment Sciences, Agricultural University of Hebei/The Key Laboratory of Agro-Ecological Environment of Hebei/Di Hongjie Soil and Environment Laboratory of Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2 School of Public Administration, Hebei University of Economics and Business/Institute of Land Resource Utilization and Evaluation, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China; 3 Yuhuan Environmental Technology Company Limited, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: 【Objectives】In order to introduce an inverse dispersion technique to evaluate N₂O emissions from greenhouse with vegetable production, static box gas collection instruments with gas chromatography analysis were used simultaneously to check N₂O emission. The results were compared and analyzed to test the feasibility of this new approach. 【Methods】In the vegetable greenhouses of the facility, a fertilizing area and a non-fertilizing area were set up. Using box-type method and micro-meteorological method to carry out 72-hour high-frequency monitoring and full-growth monitoring, N₂O concentration characteristic curve and emission flux characteristic

收稿日期: 2019-12-04 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系蔬菜产业创新团队项目 (HBCT2018030206); 河北省高等学校青年拔尖人才计划项目 (BJ2017025)。

联系方式: 王琛 E-mail: wchen_0@163.com

* 通信作者 郭艳杰 E-mail: guoyanjie928@126.com; 张丽娟 E-mail: lj_zh2001@163.com

curve were constructed by measuring results. **【 Results 】** The results showed that the N_2O concentration at 3.5 m above the shed area of the vacant period was significantly lower than that of the planting period. The nighttime concentration during the vacant period was higher, and the daytime concentration during the planting period was higher. The concentration of N_2O in the greenhouse decreased with the increase of height, and the difference of N_2O concentration between different heights was significant, which was higher than the external background concentration. The result of the N_2O daily emission characteristics by static box/gas chromatogram method and inverse dispersion technique had good consistency, but the former was generally higher than the latter. The average three-day emission flux measured by inverse dispersion technique was $192.2 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. The average gas emission flux measured by static box/gas chromatogram was $252.5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. The difference was 26.8%. In both ways, the flux curve tended to be consistent across the entire growing season of the plant tomato. The cumulative emission flux measured by static box/gas chromatogram was $1817.5 \text{ g}/\text{hm}^2$, and the emission factor was 0.45%. The cumulative emission flux measured by inverse dispersion technique was $1250.95 \text{ g}/\text{hm}^2$, and the emission factor was 0.32%, which was 29% lower than that measured by the static box method. **【 Conclusions 】** The results of the inversion gas diffusion model and the static box/gas chromatography method on the N_2O flux in the vegetable field planting area have good consistency. But the results of the inverse dispersion technique are significantly lower than those of the static box/gas chromatogram method. However, the inversion gas diffusion model has a high degree of automation, which can monitor the whole process of N_2O emission in the vegetable field with high density and is suitable for observation in a large area. It provides a reference for the existing measurement methods and provides new ideas for establishing a diversified N_2O emission monitoring system.

Key words: greenhouse vegetable; static chamber/gas chromatogram; inverse dispersion technique; N_2O

氧化亚氮 (N_2O) 是重要的温室气体之一, 其增温效果是 CO_2 的三百倍以上, 同时还具有消耗平流层臭氧的作用。若全球 N_2O 总量增加一倍, 平流层臭氧就会随之减少 10%^[1]。2018 年 WMO 温室气体公报显示, N_2O 摩尔分数达到了 $(328.9 \pm 0.1) \mu\text{g}/\text{L}$, 已达到工业革命前 ($270 \mu\text{g}/\text{L}$) 水平的 122%^[2]。农业活动是 N_2O 人为排放源的重要组成部分, 每年因化学肥料使用造成的 N_2O 排放高达 335 万 t, 占人类活动总释放量的 47%^[3]。截止到 2016 年底, 我国设施菜田总面积已经达到 391.5 万 hm^2 , 且依旧呈增长趋势^[4]。以高产为目的的高水肥投入是目前设施蔬菜种植的普遍现象^[5-6]。据统计, 设施菜田的单季化肥使用量可达 $1200 \text{ g}/\text{hm}^2$, 是小麦等大田粮食作物的 4~6 倍^[7-8]; 单季总灌溉量可达 1000 mm 左右, 单次灌溉平均可达 60~70 mm^[9]。棚室内高温、高湿、密闭的小气候环境为土壤矿化作用、硝化作用和反硝化作用等土壤氮素转化过程创造了条件, 加剧了设施菜田的 N_2O 排放, 因此精确测定设施菜田的 N_2O 排放量, 能为减肥减药等绿色农艺措施提供重要的参考依据, 对农业可持续发展具有重要意义。

当前监测设施菜田 N_2O 排放的主要方法是静态箱/气相色谱法, 具有使用灵活、操作简便、精度高等优点, 但是其实测面积较小, 在较大区域且排放

存在一定空间变异性的环境下进行观测时易产生较大的误差。同时, 设施栽培会形成对土壤排放气体有较强滞留作用的特殊小气候环境, 仅以箱式法监测土壤 N_2O 排放难以全面评估棚室内 N_2O 排放的全过程。本试验引入了反演式气体扩散模型, 该模型对于较大区域的精确测量具有优势。已往的研究表明, 该方法在仪器放置合理、测定时间适宜的前提下, 准确度可达 $(100.0 \pm 2.2)\%$ ^[10]。反演式气体扩散模型曾主要应用于畜牧业的温室气体排放监测, 同时还用来监测养殖场的氨排放^[11]和甲烷排放^[12]。国际上也有少量使用该方法对菜田 N_2O 排放监测的研究, Bai 等^[13]应用该技术对密集化蔬菜种植场的 N_2O 昼夜排放通量进行了研究; Shu 等^[14]在研究高氮投入的蔬菜种植系统氮的气态损失中也使用了该技术, 但目前还没有使用此方法对设施菜田进行监测的研究^[15]。本试验引入反演式气体扩散模型, 结合反演式气体扩散模型和静态箱/气相色谱法对设施菜田种植区的 N_2O 排放通量进行估算, 量化结果差异, 对比排放规律和特征, 探究差异产生的原因, 以期对设施菜田 N_2O 排放通量提供新的测定和估算方法, 建立多元化的 N_2O 排放监测体系, 为我国设施菜田的 N_2O 减排、肥料减施增效等措施提供数据基础和科学依据。

1 材料与方方法

1.1 试验地概况

本试验设在河北省保定市博野县南小王乡的仟畝社农业种植园区(北纬 38°24'22"、东经 115°30'58"), 10 个棚室规格相同, 为长 100 m × 宽 8 m × 高 1.8 m, 棚室间距 4.8 m, 棚区周围无高大建筑物, 试验装置安放如图 1。供试作物为番茄, 试验棚区采用推荐水肥管理, 整地前施用基肥, 施用量为 25 t/hm² 有机肥(氮含量 0.46%) 和 600 kg/hm² 复合肥(16-16-16); 追肥两次, 每次施用 600 kg/hm² 复合肥(16-16-16), 基肥采用撒施和漫灌施肥灌水方式, 追肥为浅沟和畦灌。

1.2 静态箱/气相色谱法对棚区 N₂O 排放通量的监测

1.2.1 棚区番茄全生长季 N₂O 排放通量的监测 选取由北向南第 3、7、9 棚室, 每个棚室设置施肥区和非施肥区, 非施肥区面积占棚室总面积的 5%, 用沟壑将施肥区与非施肥区隔开, 以保证非施肥区不受施肥措施干扰。分别在施肥区和非施肥区各设置 3 组采样点, 每组采样点包括分别位于浅沟和菜畦上的两组静态箱, 最终以 36 组静态箱估算整个棚区 N₂O 排放通量。静态箱由 PVC 材质制作而成, 选用圆柱体结构, 内径 13.8 cm、高 15.5 cm, 箱体装有三通阀和瞬时温度计, 通过水槽封闭气体, 并用聚氯乙烯包裹箱体, 整体静态箱规格符合 IPCC 的 N₂O 测定标准^[6]。安放时罩箱底座没入土壤中, 对气体进行取样时将箱体扣于底座上, 并加水密封。

采样期选取每次施用基肥或追肥的前一天开始, 至施肥后第 7 天结束, 平时每 10 天采集样品一次。采样时间选取上午 9 点至 11 点, 采样方式为每隔 10 min 使用注射器抽取罩箱内气体一次, 每次 40

mL, 共取 3 次, 并同步记录箱内温度。气体样品采用 Agilent-7890 型气相色谱仪测定 N₂O 浓度。

1.2.2 棚区 72 h 的高频监测 采样点布置、静态箱采样方式均与全生长季监测时相同, 监测时间选取一次追肥后的 72 h 进行高频连续监测, 采样期间同步以注射器采集静态箱上方 30、100、170 cm 高处气体, 估算棚室不同高度 N₂O 浓度分布规律, 采样频率为 3 h/次。气体样品采用 Agilent-7890 型气相色谱仪测定 N₂O 浓度。

1.2.3 静态箱/气相色谱法测定排放通量的相关计算

$$F = \rho \times H \times T_0 \frac{(c_2/T_2 - c_1/T_1)}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量[mg/(m²·h)]; $\rho = m/22.414$, 为气体浓度(g/L), m 分子量; H 为箱体高度(m); $T_0 = 273$ K; $\Delta t = t_2 - t_1$, t_1 和 t_2 为取样时间(h); c_1 和 c_2 是 t_1 和 t_2 时间箱内气体浓度(μg/kg); T_1 和 T_2 是 t_1 和 t_2 时间箱内气体温度(K)。

1.2.4 静态箱/气相色谱法排放系数的相关计算

N₂O 排放系数的计算参照 IPCC 规定, 为单纯化肥氮施用引起的 N₂O-N 排放总量与总施氮量的比值, 建议旱地化肥氮的 N₂O-N 排放系数为 1%。计算公式如下:

$$EF_d = (E_f - E_c)/N \times 100\% \quad (2)$$

式中, EF_d 是排放系数; E_f 和 E_c 分别为施氮肥和不施氮对照处理下 N₂O 排放总量; N 为施氮肥量^[17-18]。

1.3 基于反演式气体扩散模型对棚区 N₂O 排放通量的监测

1.3.1 气体样品的采集与测定 反演式气体扩散模型是建立在下垫面均匀和风速廓线可以用莫宁-奥布霍夫相似理论(Monin-Obukhov Similarity Theory)重建^[19]两个假设基础之上。因此, 为了达到微气象学方

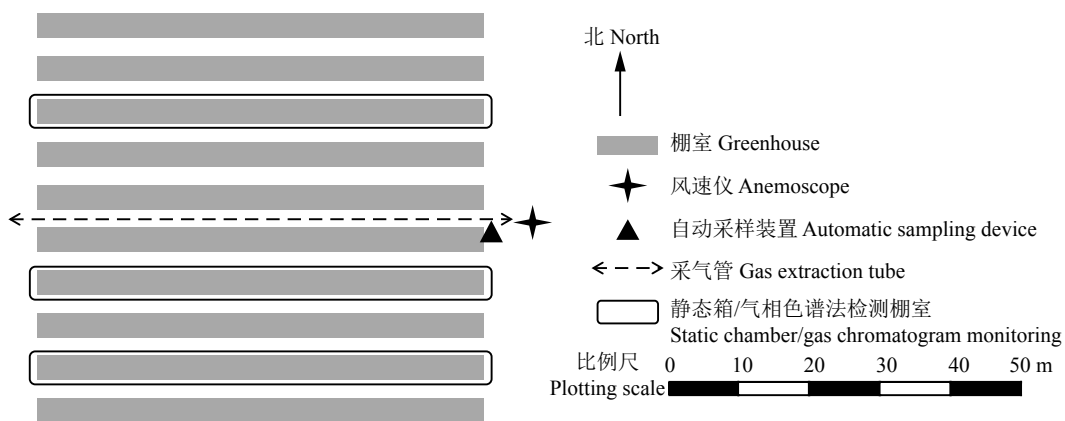


图 1 棚区布局和测定仪器安放示意图

Fig. 1 The layout of greenhouse and the arrangement of instruments

法需要均匀的下垫面, 从而保证监测点水平风场的均匀, 本试验通过将采气高度提高到 3.5 m 高处 (约为棚室高度的 2 倍), 使得风场的扰动可以得到处理, 将棚区对风场的干扰降到最低^[20], 以致忽略棚室构造对风场和湍流的影响。

反演式气体扩散模型观测时间的选取与静态箱/气相色谱法相同。采气期间使用自动采样装置收集棚区上方 3.5 m 处的气体样品。自动采样装置主要由采样管、气泵、混气箱、中央控制器、电磁阀及采气袋 6 部分组成。选用长 100 m、内径 4 mm 的聚乙烯采样管, 采样管每隔 10 m 设进气口一个, 运转设备时以针型阀将每个进气口的流速调至 2 L/min。气泵的进气口和出气口分别连接采样管和混气箱。混气箱为 2 L 容积的密闭 PVC 圆筒。混气箱连有进气管和出气管, 其中进气管与采样管相连, 出气管与控制气体进出的电磁阀相连。中央控制器主要由一个触控式显示屏和 48 个电磁阀构成, 可通过显示屏设置每个通气阀的开闭时间。自动采样装置运行时, 中控系统向 48 个电磁阀依次发送指令, 每个电磁阀的开启时间为 30 min, 期间气体样品以 30 mL/min 的流速流入对应的采样袋中。每 30 min 完成一次样品收集, 每天收集 48 组样品。气体样品采用 Agilent-7890 型气相色谱仪测定。

1.3.2 气象信息的收集 风速、风向和湍流等气象信息采用三维超声风速仪 (Gill Instrument Ltd. Lymington, UK) 同步测定, 风速仪安装在采气管一端, 高度为 3.5 m (与采气管高度相同), 气象信息收集频率为 10 Hz, 测得数据实时保存在计算机的 EdiSol 软件上。气象数据采用 MATLAB 软件计算出每 30 min 的平均风速 (U)、风向 (β)、地面粗糙度 (z_0)、大气稳定度 (L)、三维方向大气涡旋度 ($\sigma_{u, v, w}$)、地面摩擦风速 (u^*) 和湍流 ($\sigma_{u, v, w}/u^*$)。

1.3.3 棚区 N_2O 的背景浓度测定 在测定工作开始前, 使用自动采样装置于棚区上风处测定棚区田闲期的 N_2O 背景浓度, 构建 N_2O 的背景浓度曲线, 并于测定工作开始后每天以注射器采集棚区上风处气样, 随时对 N_2O 的背景浓度值进行调整。采集次数由当天大气稳定程度决定, 采集次数随大气稳定程度下降而增加。

1.3.4 反演式气体扩散模型排放系数的相关计算 以反演式气体扩散模型监测棚室田闲期 N_2O 排放量作为棚区 N_2O 排放的空白值; 监测棚区田闲期灌溉后 N_2O 排放量作为棚区灌溉时 N_2O 排放的空白值。综合棚区田闲期土壤排放和灌溉排放, 估算棚区无

施肥状态下全季总排放量。排放系数计算公式与静态箱/气相色谱法相同[见公式 (2)]。

1.3.5 反演式气体扩散模型排放通量的相关计算

将风速 (U)、风向 (β)、地面粗糙度 (z_0)、地面摩擦风速 (u^*)、大气稳定度 (L)、三维方向大气涡旋度 ($\sigma_{u, v, w}$) 等基本微气象信息及排放源与测定位点的空间几何关系等信息导入 WindTrax 软件中构建模型, 通过模型计算测定位点气体浓度和排放源源强的比值 $[(C_L - C_b)/Q]_{sim}$ 。计算公式如下:

$$[(C_L - C_b)/Q]_{sim} = 1/p \sum_{j=1}^p (1/n \sum |2/W_0|) \quad (3)$$

式中: $C = C_L - C_b$, C_L (mg/m^3) 表示测定位点 N_2O 的浓度; C_b (mg/m^3) 表示所测当地背景浓度值; Q (m^3) 分别带入测定位点的 N_2O 排放强度; p 为测定光程平均位点数; n 表示该随机模型重复计算的次数; W_0 表示排放源内触位点上垂直方向风速。

考虑棚区 3 个棚室内存在非施肥区域, 微气象学方法对设施番茄施肥期的监测结果需按照非施肥区域面积占比进行修正。

1.3.6 数据质量控制 反演式气体扩散模型的优点是对排放源面积和形状敏感性很低, 但在风速较低、大气极度稳定或极度不稳定、地面植被较高或地面存在明显干扰气体扩散的障碍物等条件下准确度较低。这是由于在 $u^* < 0.15$ m/s、 $L < 10$ m 或 $z_0 > 0.15$ m 时, 莫宁-奥布霍夫相似理论准确性较低。为了控制数据质量, 本试验根据 Flesch 等^[21]、Van Haarlem^[22]总结的数据剔除标准 (表 1), 对浓度数据和风以及湍流数据进行筛选, 符合要求的数据则进行 N_2O 排放量的计算。

表 1 反演式气体扩散模型计算 N_2O 排放的数据筛选标准
Table 1 Criteria used to filter data for the calculation of N_2O emission

项目 Item	指标 Index
地面摩擦风速 Ground friction wind speed (u^* , m/s)	<0.15
大气稳定度 Atmospheric stability (L , m)	< 10
地面粗糙度 Terrain roughness (z_0 , m)	>0.15

2 结果与分析

2.1 棚区上方 3.5 m 处 N_2O 浓度变化规律

通过反演式气体扩散模型监测得到的棚区田闲期 3.5 m 高处的 N_2O 浓度变化如图 2A 所示, 此时期内棚区 N_2O 浓度变化幅度较小, 浓度变化范围为 343.7~350.6 $\mu g/L$, 稍高于 2018 WMO 温室气体公报

给出的全球 N₂O 背景浓度 (328.9 ± 0.1) μg/L。夜间平均浓度高于白天, 原因为棚区白天风速较高, 气体扩散速度快。

棚区种植期 3.5 m 高处的 N₂O 浓度变化如图 2B 所示, N₂O 浓度变化范围为 354.0~364.6 μg/L, 明显高于棚区 N₂O 的背景浓度。棚区种植期白天 N₂O 的平均浓度稍高于夜间, 与田闲期相反。种植期棚区 3.5 m 高处的 N₂O 浓度在上午的 8:00—9:00 达到最高峰值。

2.2 棚室内不同高度 N₂O 浓度分布规律

通过静态箱收集测定到的 N₂O 排放结果 (图 3) 可以看出, 棚室内 N₂O 浓度随高度增加呈下降趋势, 不同高度间 N₂O 浓度差异明显, 皆高于外界背景浓度。0.3、1、1.7 m 高处的 72 h 平均浓度分别为 380.4、373.3、363.7 μg/L。每天棚室内 N₂O 的浓度峰值分别出现在上午 9:00 左右和傍晚 18:00 左右。

5 月 31 日期间棚室外风速较大, 1.7 m 高处采样点与棚室通气口距离较近, 使其 N₂O 浓度接近外界背景浓度。

2.3 棚区 N₂O 日排放规律

图 4 是两种方法测得的 N₂O 日排放特征曲线, 两条特征曲线大致趋势一致, 但静态箱法测得结果普遍高于微气象学法测定结果。但是, 两种方法测得 N₂O 排放峰值分别出现在每天的 15:00 到 18:00, 静态箱法的 N₂O 排放峰值通常较反演式气体扩散模型提前 3 h 左右。静态箱法测得的平均排放通量为 252.51 μg/(m²·h), 高于反演式气体扩散模型测定结果 192.21 μg/(m²·h), 高出 26.75%。

从图 4 还可以发现, 72 h 高频监测中两个完整昼夜的 N₂O 排放平均值分别为 312.20 和 174.47 μg/(m²·h), 与各自方法当天 9:00 到 12:00 的排放通量一致, 说明棚室种植方式可用 9:00 到 12:00 间的采

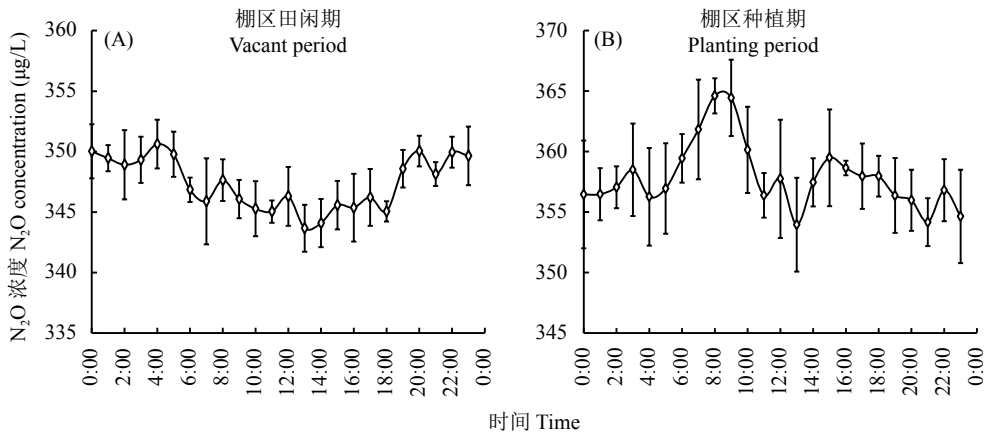


图 2 测定期间棚区地表 3.5 m 处氧化亚氮浓度分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of nitrous oxide concentration at 3.5 m surface area of shelter area during measuring period

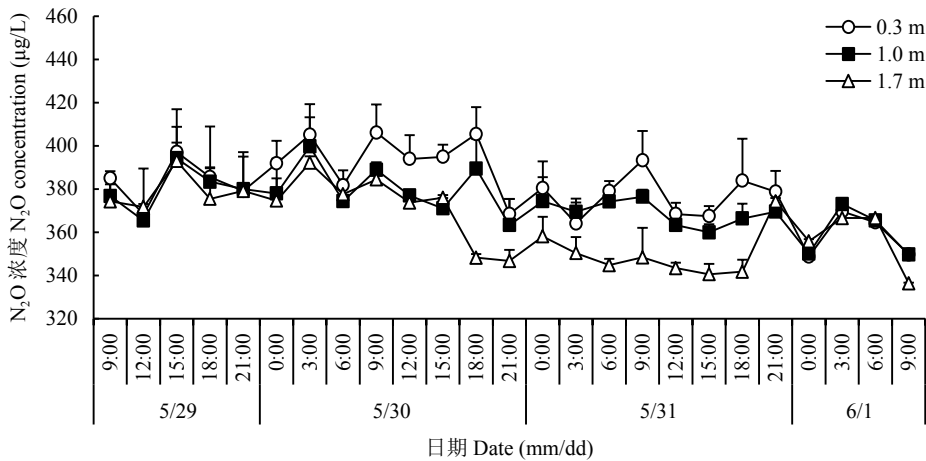


图 3 棚室内不同高度处 N₂O 浓度分布特征

Fig. 3 Characteristics of distribution of N₂O concentration at different heights in greenhouse

样结果代表一天平均排放通量。

2.4 棚室番茄全生长季 N₂O 排放特征

从整个番茄生长季中，静态箱/气象色谱法测得的 N₂O 排放结果普遍高于微气象学法，但是排放特征曲线大致相同 (图 5)。施肥并翻耕土层会造成少量的 N₂O 排放，进行灌溉后 N₂O 排放呈爆发式增长。每次施肥+灌溉事件造成的排放峰持续 7 天左右，排放最大值通常出现在灌溉后第 3 天。两种方法测得的棚区 N₂O 空白排放通量接近，远低于施肥后的排放量。对非施肥区进行灌溉会造成较小的 N₂O 排放峰，排放峰值持续时间为 2~3 天。

2.5 静态箱/气相色谱法和反演式气体扩散模型方法测定结果的比较

分析棚室番茄全生长季 3 次施肥后棚区 N₂O 的累计排放量 (图 6)，其中静态箱/气相色谱法测定排放系数范围为 0.37%~0.56%，反演式气体扩散模型

的测定排放系数范围为 0.27%~0.40%。测定结果均与 IPCC 清单默认排放系数 1% 差距较大，在 2 倍左右，其中在基肥施用期内测定的结果差异最大。

由表 2 可知，通过静态箱/气相色谱法、反演式气体扩散模型分别估测的 N₂O 累计排放通量为 2083.72、1371.44 g/hm²，土壤净排放量为 1817.49、1250.95 g/hm²，测得的 N₂O 排放系数分别为 0.45%、0.32%。其中反演式气体扩散模型测得结果较静态箱法降低了 29%，远低于 IPCC 清单默认排放系数。

3 讨论

3.1 反演式气体扩散模型与静态箱/气相色谱法测定结果的差异性分析

本研究尝试将反演式气体扩散模型引入设施菜田监测分析 N₂O 排放，通过仪器的合理安放及准确的背景浓度测量，使测定结果与静态箱/气相色谱法

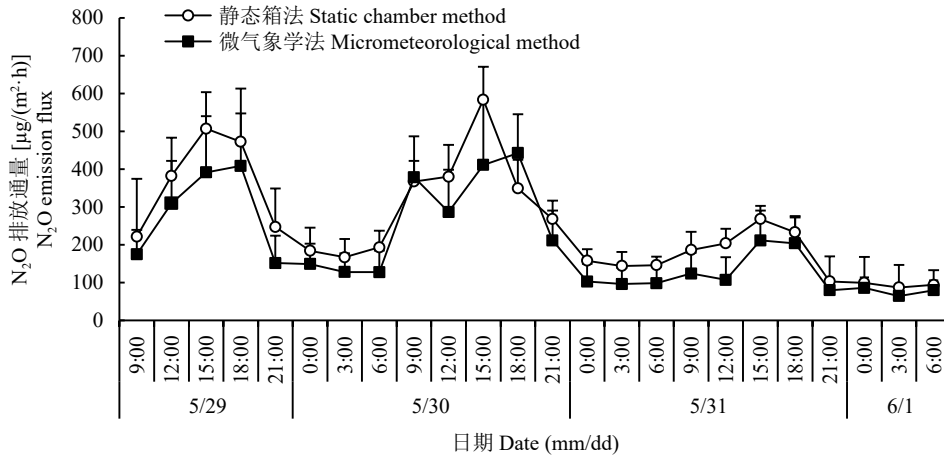


图 4 棚区 N₂O 的日排放特征

Fig. 4 Characteristics of daily N₂O emission in greenhouse

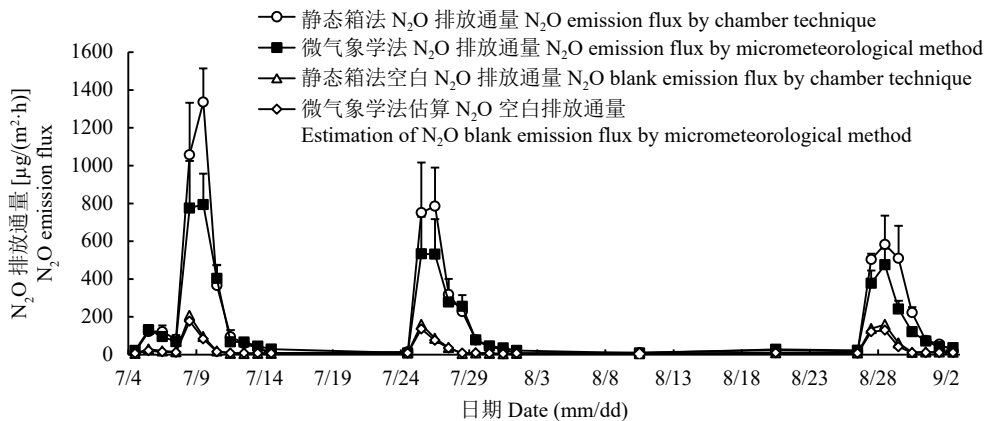
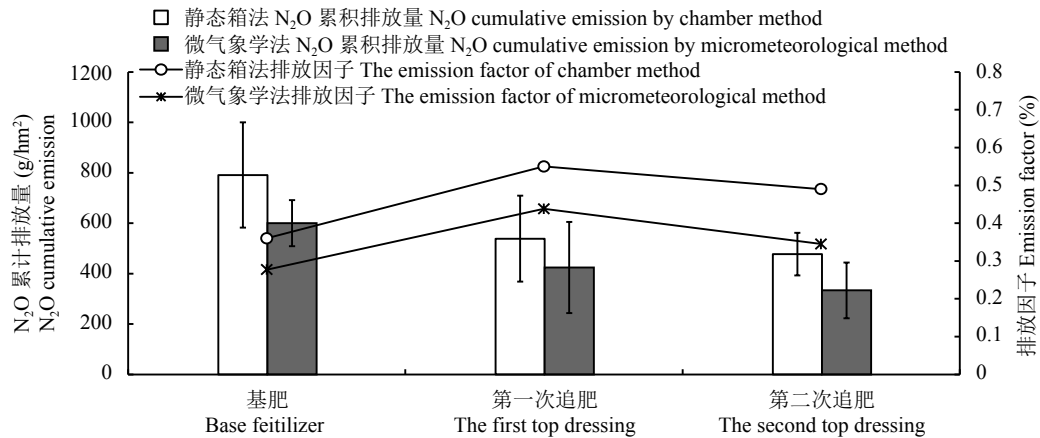


图 5 棚室番茄全生长季 N₂O 排放特征

Fig. 5 Characteristics of N₂O emission in greenhouse during whole growing season of tomato

图 6 不同施肥期的 N₂O 累计排放量Fig. 6 Accumulated N₂O emission at different fertilization stages in greenhouse vegetable system表 2 棚区整个生长季 N₂O 排放通量估算Table 2 Estimation of N₂O emission flux in greenhouse vegetable system

监测方法 Monitoring method	累计排放量 (g/hm ²) Cumulative emission flux	空白排放量 (g/hm ²) Emission in control	土壤净排放量 (g/hm ²) Net emission from soil	N ₂ O 排放系数 (%) N ₂ O emission coefficient
静态箱法 Static box method	2083.72	266.23	1817.49	0.45
微气象学方法 Micrometeorological method	1371.44	97.56	1250.95	0.32

结果达成了较高的一致, 说明反演式气体扩散模型观测结果具有可信性, 达到了试验预期。但两种方法对棚区 N₂O 观测结果产生了 29% 的明显差异, 分析原因可能有以下几点: 1) 两种方法所测通量的空间代表性存在差异, 静态箱/气相色谱法以 3 个棚室内的 36 个箱体作为信息源, 虽然在一定程度上克服了土壤 N₂O 排放的空间差异, 但是实测面积仅为 2.15 m² (598 cm² × 36 个), 与信息源可覆盖整个棚区的微气象学方法相比较存在样品来源少、代表性不均匀等缺陷^[23-24]。因此, 静态箱/气相色谱法的采样点布置可能还不足以均衡整个棚区 N₂O 排放的空间差异性。2) N₂O 排放通量在不同时间里的变化可以通过微气象学方法连续捕获测量, 而静态箱法以较短时间的检测结果来估算全天排放通量可能不足以均衡棚区全天 N₂O 排放在时间上的差异^[25]。3) 棚室具有高浓度的 N₂O 环境和湿润的小气候, 高浓度 N₂O 环境会抑制土壤 N₂O 排放, 湿润的小气候有利于 N₂O 进一步向 N₂ 转化, 因此可能发生 N₂O 的负排放现象^[26-28], 棚室内气体与土壤必然存在 N₂O 气体的交换, 而静态箱/气相色谱法由于无法采用自动化监测, 且采样频率低, 因此无法对这一过程进行实时监测, 导致实际测量结果偏高。4) 静态箱/气相色谱

法受箱体温度影响较大。箱体受阳光照射后, 即使存在绝缘层, 仍然不可避免会导致箱体内温度的升高, 使箱内土壤 N₂O 排放速率提高, 导致监测结果偏高^[29]。5) 强对流气候和大气稳定程度较高的环境都会导致反演式气体扩散模型对 N₂O 排放通量监测时出现较大误差^[30], 计算时需要将这部分数据剔除, 并按照线性关系插补空白数据, 此过程中可能低估了棚区 N₂O 的排放。6) 棚室的密闭结构会对土壤排放的 N₂O 气体造成一定滞留, 造成在棚室内外完成监测的两种方法存在结果差异, 使反演式气体扩散模型最终测定结果偏小。7) 由于反演式气体扩散模型测算的气体排放量是整个棚区覆盖面积的排放量^[11, 13, 31], 无法区分施肥和非施肥区, 因此我们尝试以反演式气体扩散模型监测棚室空闲期 N₂O 排放通量作为非施肥区空闲期排放通量; 并在棚区空闲期对单个棚室进行灌溉处理, 模拟对非施肥土壤灌溉后的 N₂O 排放。综合棚区空闲期土壤排放和灌溉排放, 估算棚区非施肥状态下全季总排放量。8) 在实际气体样品采集过程中, 由于人员走动可能会对小部分非施肥区土壤产生影响, 但因静态箱法监测面积有限, 非施肥区整体排放与静态箱法测定结果可能存在部分差异, 我们也尽量将此部分影响降到

最小。

反演式气体扩散模型和静态箱/气相色谱法对设施菜田的观测结果存在一定差异, 主要是由于两种方法测定的信息源不同, 导致反演式气体扩散模型测定结果低于静态箱/气相色谱法, 但两种方法测定结果均反映出了 N_2O 排放的规律, 并具有一致性, 这对探究设施蔬菜 N_2O 排放规律起到一定的指导作用。本研究仅就短季番茄种植期初步探索了 N_2O 排放监测与估算方法比较, 尚需开展长期多季的监测对比分析; 再者, 应进一步分析确定具体的结果差异和误差来源, 以确保在使用这两种方法观测设施菜田 N_2O 排放通量时具有可比性和统一性。

3.2 不同方法测定结果与 IPCC 清单 N_2O 排放系数比较的意义

将反演式气体扩散模型与静态箱/气相色谱法的测定结果与 IPCC 清单 N_2O 排放系数比较可以发现, 在 3 个施肥期中, IPCC 清单 N_2O 排放系数是静态箱/气相色谱法观测结果的 1.7~2.7 倍, 是反演式气体扩散模型的 2.5~3.7 倍, 且 IPCC 法对混施有机肥和化肥的估算误差高于单施化肥, 估算排放系数与实测排放系数存在较大差异。Anita Shepherd 等研究表明 IPCC 旱地排放系数具有 0.3%~3.0% 的不确定性, 水田排放系数具有 0.6% 的不确定性^[32], 排放系数本身变动区间较大, 而以我国目前的排放系数监测数据链难以对排放系数进行准确估算, 张强等^[33]在研究中发现, 目前我国不同地区排放系数监测频率差距较大, 且存在观测频率低、田间处理单一、无年际重复、无不施氮处理等一系列问题, 使得我国在以 IPCC 清单模型估算时存在较大误差。本试验首次在国内尝试引入反演式气体扩散模型进行设施菜田的 N_2O 通量观测, 为监测设施农田 N_2O 排放提供了新的研究和实践思路, 对建立健全我国氮排放清单具有重要的实践意义。

4 结论

反演式气体扩散模型与静态箱/气相色谱法对设施菜田种植区 N_2O 排放通量的测定结果一致性较好, 但反演式气体扩散模型观测结果明显低于静态箱/气相色谱法, 不过反演式气体扩散模型自动化程度高, 可以高密监测设施菜田 N_2O 排放全过程, 这为监测设施农业较大区域 N_2O 排放提供了新的方法, 为我国农业生产中减肥增效提质建立了一种新的方法与参考依据。

参 考 文 献:

- [1] 孙光, 李果, 罗遵兰, 等. 旱地土壤 N_2O 排放特征及影响因素分析[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1220-1224.
Sun G, Li G, Luo Z L, *et al.* Analysis of N_2O emission characteristics and influencing factors in dryland soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(5): 1220-1224.
- [2] World Meteorological Organization. WMO greenhouse gas bulletin (GHG Bulletin): The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017[R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), Global Atmosphere Watch (GAW), 2018.
- [3] Srocker T F, Qin D H, Plattner G K, *et al.* Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] 张真和, 马兆红. 我国设施蔬菜产业概况与“十三五”发展重点—中国蔬菜协会副会长张真和访谈录[J]. 中国蔬菜, 2017, (5): 1-5.
Zhang Z H, Ma Z H. China's facility vegetable industry overview and "13th Five-Year" development focus - Interview with Zhang Zhenhe, vice president of China Vegetable Association[J]. Chinese vegetables, 2017, (5): 1-5.
- [5] Fan Z B, Lin S, Zhang X M, *et al.* Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144(2): 11-19.
- [6] Zhou J, Gu B, Schlesinger W H, *et al.* Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25088.
- [7] Zhu J H, Li X L, Christie P, *et al.* Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 111(1): 70-80.
- [8] Song H, Guo J, Ren T, *et al.* Increase of soil pH in a solar greenhouse vegetable production system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(6): 2074.
- [9] Ren T, Christie P, Wang J G, *et al.* Root zone soil nitrogen management to maintain high tomato yields and minimum nitrogen losses to the environment[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(1): 25-33.
- [10] Harper L A, Flesch T K, Powell J M, *et al.* Ammonia emissions from dairy production in Wisconsin[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92: 2326-2337.
- [11] 袁慧军, 高志岭, 马文奇, 等. 应用反演式气体扩散技术测定奶牛场甲烷的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 746-752.
Yuan H J, Gao Z L, Ma W Q, *et al.* Determination of methane emissions from a dairy feedlot using an inverse dispersion technique [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(4): 746-752.
- [12] 杨园园, 王雪君, 刘春敬, 等. 应用反演式气体扩散模型测定奶牛养殖场氨排放特征研究[J]. 河北农业大学学报, 2016, 125(4): 4-6.
Yang Y Y, Wang X J, Liu C J, *et al.* Determination of ammonia emissions from dairy feedlot using an inverse dispersion technique[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016, 125(4): 4-6.
- [13] Bai M, Helen S, Shu K L, *et al.* Use of open-path FTIR and inverse dispersion technique to quantify gaseous nitrogen loss from an intensive

- vegetable production site[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 258(8): 50–55.
- [14] Shu K L, Helen S, Rohan D, *et al.* Measurement and mitigation of nitrous oxide emissions from a high nitrogen input vegetable system [J]. *Scientific Reports*, 2015, 92: 2326–2337.
- [15] Flesch T K, Wilson J D, Yee E. Backward-time lagrangian stochastic dispersion models and their applications to estimate gaseous emissions [J]. *Journal of Applied and Applied Meteorology*, 1995, 34: 1320–1332.
- [16] IPCC. Intergovernmental panel on climate change guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Paris: OECD, 1996.196–239.
- [17] 王艳丽. 京郊设施菜地水肥一体化条件下土壤 N₂O 排放的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院硕士论文, 2015.
Wang Y L. N₂O emissions from a vegetable field with fertigation management under greenhouse conditions in Beijing suburbs[M]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [18] 张婧, 李虎, 王立刚, 等. 京郊典型设施蔬菜地土壤 N₂O 排放特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 4088–4098.
Zhang J, Li H, Wang L G, *et al.* N₂O emission characteristics of typical protected vegetable fields in Beijing suburb[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 4088–4098.
- [19] Flesch T K, Wilson J D, Harper L A, *et al.* Deducing ground-to-air emissions from observed trace gas concentrations: A field trial[J]. *Journal of Applied and Applied Meteorology*, 2004, 43: 487–502.
- [20] Garratt J R, Dessler A J, Houghton J D, *et al.* The atmospheric boundary layer[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37: 89–134.
- [21] Flesch T K, Wilson J D, Harper L A, *et al.* Determining ammonia emissions from a cattle feedlot with an inverse dispersion technique [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 144: 139–155.
- [22] Van Haarlem R P, Desjardins R L, Gao Z, *et al.* Methane and ammonia emissions from a beef feedlot in western Canada for a twelve-day period in the fall[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2008, 88: 641–649.
- [23] Röver M, Heinemeyer O, Munch J C, *et al.* Spatial heterogeneity within the plough layer: high variability of N₂O emission rates[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31: 167–173.
- [24] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories volume 4: Agriculture, forestry, and other land use[M]. Paris: OECD, 2006.475–505.
- [25] Turner D A, Chen D, Galbally I E, *et al.* Spatial variability of nitrous oxide emissions from an Australian irrigated dairy pasture[J]. *Plant and Soil*, 2008, 309: 77–88.
- [26] Castellano M J, Schmidt J P, Kaye J P, *et al.* Hydrological and biogeochemical controls on the timing and magnitude of nitrous oxide flux across an agricultural landscape[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 1–17.
- [27] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N₂O 排放对比观测研究[J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(6): 691–701.
Yao Z S, Zheng X H, Zhou Z X, *et al.* Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu region: A comparison case study[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(6): 691–701.
- [28] Chen H Y, Li H, Wang L G, Qiu J J. Characteristics and influencing factors on nitrous oxide emissions from typical greenhouse vegetable fields in Beijing suburbs[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (5): 5–10.
- [29] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N₂O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(1): 7–10.
Xie J F, Li Y E. Effect of soil temperature on N₂O emission from farmland in Beijing dryland[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(1): 7–10.
- [30] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 290–298.
Zheng Z M, Yu G R, Sun X M, *et al.* Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 290–298.
- [31] McGinn S M, Flesch T K, Crenna B P, *et al.* Quantifying ammonia emissions from a cattle feedlot using a dispersion model[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(6): 1585–1590.
- [32] Shepherd A, Yan X Y, Nayak D, *et al.* Disaggregated N₂O emission factors in China based on cropping parameters create a robust approach to the IPCC tier 2 methodology[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: 272–281.
- [33] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 7–13.
Zhang Q, Ju X T, Zhang F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7–13.