

刘敏, 张翀, 巨晓棠, 等. 箱体结构及计算方法对夏玉米农田 N_2O 排放测定结果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1284–1290.

LIU Min, ZHANG Chong, JU Xiao-tang, et al. Effects of chamber size and calculation method on N_2O emissions during the summer maize growing season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1284–1290.

箱体结构及计算方法对夏玉米农田 N_2O 排放测定结果的影响

刘敏^{1,2}, 张翀¹, 巨晓棠^{1*}, 苏芳^{1*}, 陈新平¹, 江荣凤¹

(1. 农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 钦州学院资源与环境学院, 广西钦州 535000)

摘要:为探讨不同箱体结构及计算方法对夏玉米农田 N_2O 排放测量结果的影响, 于 2012—2013 年在中国农业大学曲周实验站采用静态箱-气相色谱法研究了 4 个处理在夏玉米季 N_2O 排放结果, 即大箱+直线算法、小箱+直线算法、大箱+曲线并直线算法及小箱+曲线并直线算法。小箱顶部中央留孔使玉米茎能够通过采样箱顶部而不影响玉米生长, 大箱在玉米生长到 50 cm 以后压弯玉米植株。研究表明: 在定量夏玉米农田土壤 N_2O 排放时, 与不破坏玉米根系正常生长的小箱测定结果相比, 因使用大箱并压弯玉米造成玉米生长不良, 不会显著影响 N_2O 累积排放量的测定结果。在 N_2O 日排放通量较强时, 曲线并直线算法与直线算法得到的结果没有显著差异; 而在 N_2O 日排放通量较弱时, 曲线并直线算法测定结果高于直线算法。由于 N_2O 排放较弱时的通量对夏玉米季农田 N_2O 累积排放量贡献很小, 因此, 曲线并直线和直线算法在计算夏玉米季农田 N_2O 累积排放量时并无显著差异。

关键词: N_2O 排放; 箱体结构; 根系生长; 计算方法; 夏玉米农田

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)06-1284-07 **doi:** 10.11654/jaes.2017-1401

Effects of chamber size and calculation method on N_2O emissions during the summer maize growing season

LIU Min^{1,2}, ZHANG Chong¹, JU Xiao-tang^{1*}, SU Fang^{1*}, CHEN Xin-ping¹, JIANG Rong-feng¹

(1. Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Qinzhou University, Qinzhou 535000, China)

Abstract: Chamber sizes and calculation methods may significantly affect the measurement results for N_2O emissions in terrestrial ecosystems when the static chamber method is used. This study compared the N_2O emissions of summer maize growing season on the North China Plain under four treatments regarding different chamber sizes and calculation methods, i.e., big chamber+linear model, small chamber+linear model, big chamber+quadratic/linear model, and small chamber+quadratic/linear model. N_2O fluxes were measured by the static chamber-gas chromatograph method. When the big chamber (hampering the growth of maize) was compared with the small chamber (no destructive effect on maize growth), the results showed that the use of the big chamber had no significant effect on the total cumulative N_2O emissions across the whole maize growth season. The daily N_2O flux calculated by the quadratic/linear model was not significantly difference with that by the linear model when the daily N_2O flux was high. However, the daily N_2O flux calculated by the quadratic/linear model was higher than the flux calculated by the linear model when the daily N_2O flux was relatively low. As the N_2O emissions within the low N_2O flux events only

收稿日期: 2017-10-17 录用日期: 2017-12-14

作者简介: 刘敏 (1982—), 女, 河北保定人, 博士, 农艺师, 主要从事农田氮循环及温室气体 N_2O 减排研究。E-mail: minminliu1025@163.com

* 通信作者: 巨晓棠 E-mail: juxt@cau.edu.cn; 苏芳 E-mail: sufang@cau.edu.cn

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503106); 国家自然科学基金项目 (31760153)

Project supported: The Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China (201503106); The National Natural Science Foundation of China (31760153)

made a small contribution to total cumulative N₂O emissions of whole summer maize season, no significant differences were observed in total cumulative N₂O emissions between the quadratic/linear model and the linear model.

Keywords: N₂O emissions; chamber size; root growth; calculation method; summer maize field

N₂O 是一种重要的温室气体,其在百年尺度上的全球增温潜势是同等质量 CO₂ 的 298 倍,同时 N₂O 能够参与平流层的光化学反应而破坏臭氧层^[1]。人类活动已改变了全球氮循环并深刻影响 N₂O 排放,大气中 N₂O 浓度已由 19 世纪中叶的 275 $\mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 2015 年的 328 $\mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$,其中农业生产活动排放的 N₂O 可占全球人为 N₂O 排放总量的 66%,农业已成为最大的人为 N₂O 排放源^[2-3]。农业源 N₂O 排放主要是由农田土壤化肥和有机肥施用引起的^[4],农田土壤 N₂O 产生机理及减排措施研究已引起科学家和政策制定者的普遍关注并成为研究热点问题之一。然而,准确地定量农田 N₂O 排放是制定排放清单及减排措施的前提。静态箱法因成本低、便于在面积较小的田块测定等优点被广泛用于农田温室气体的测定^[5]。

不同的研究者设计了不同结构的静态箱来观测农田 N₂O 排放。为了完全考虑地上部作物对 N₂O 排放的影响,Qin 等^[6]采用了长×宽×高=50 cm×50 cm×95 cm 的顶箱,玉米株高超过 95 cm 时,在静态箱底座和顶箱中间加一个无顶的中箱,以达到采样时能够完全覆盖作物的目的。Liu 等^[7]认为,只要在保持作物生长良好的前提下,箱内是否完全覆盖植物对 N₂O 排放通量测定结果无显著影响,并在研究夏玉米季农田 N₂O 排放时,采用了两种尺寸的静态箱:即在玉米株高小于 150 cm 时,使用的箱体为顶部、中部和底部长×宽×高均为 50 cm×50 cm×50 cm 的箱体,随着玉米的生长逐渐叠加到 3 层;当玉米株高超过 150 cm 后,采用长×宽×高=50 cm×30 cm×20 cm 的采样箱,该采样箱由长×宽×高=25 cm×30 cm×20 cm 的两部分组成,在其顶部中央有一个方形孔,使玉米茎能够通过采样箱顶部。在研究夏玉米季 N₂O 排放时,也有研究者为了减少采样时罩箱的复杂度,同时在一定程度上考虑作物对 N₂O 排放的影响,在作物超过静态箱高度时,将玉米切断^[8-9]。上述所有尺寸的静态箱中,将玉米切断是操作最为简单的一种,但该方法造成的玉米生长不良可能会影响 N₂O 的排放。

静态箱法测定气体通量是用罩箱后箱内气体浓度变化率所代表的通量值来近似罩箱前自然状态下的气体通量^[10-12],通常有直线回归和曲线回归两种算

法来完成这种近似。在计算农田 N₂O 排放通量时,直线算法作为一种简易的计算气体排放通量的方法被广泛使用^[13-16],而 Kroon 等^[17]在草地上的观测结果表明,直线算法会比曲线算法低估 N₂O 累积排放量。因此,有研究者在计算同一研究的 N₂O 排放通量时,会根据直线或曲线回归模型拟合的实际情况,来选择最优算法(即曲线并直线算法)计算不同采样小区的 N₂O 排放通量^[8-9,18]。

华北平原在夏玉米季具有高温高湿的气候条件,农民传统的氮肥管理具有高投入和高损失的特点^[19-20]。这样的土壤、气候及管理特点会造成农田 N₂O 排放具有独特的特征。高氮肥投入量和高强度降雨可能是驱动该地区夏玉米季 N₂O 排放峰的重要因素,因此我们认为箱体结构和计算方法对华北夏玉米 N₂O 排放总量无显著影响。为了验证上述假设,本研究在 2012 年和 2013 年在中国农业大学曲周实验站比较了不同箱体结构和算法下夏玉米季农田 N₂O 排放通量的结果,以期为准确定量农田 N₂O 排放通量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验点位于河北省邯郸市曲周县中国农业大学曲周实验站(36.87°N,115.02°E),海拔高度为 37 m。该地区属典型温带半湿润季风气候区,年平均气温为 13.1 °C,年平均降雨量为 556 mm,其中约三分之二的降雨集中在 6—9 月。土壤类型为潮土,供试土壤基础理化性状:容重为 1.32 g·cm⁻³,土壤 pH 为 8.2(土水比为 1:2.5),有机质含量为 13.7 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.8 g·kg⁻¹,速效磷含量为 6.7 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 114 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计与田间管理

本研究依托于自 2007 年开始的“冬小麦/夏玉米轮作体系氮素实时监控技术研究”长期定位试验^[21],选取其中的一个处理作为本研究的对象,该处理设 4 次重复,小区面积为 20 m×15 m=300 m²。本研究于 2012 年和 2013 年夏玉米季进行。玉米品种为郑单 958,行距为 60 cm,株距为 25 cm。2012 年 6 月 15 日收获冬小麦并将秸秆还田,之后用机器播种夏玉米并

灌水 90 mm。2012 年 7 月 3 号开沟施肥,施氮量为 $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,7 月 13 号撒施氮肥,施氮量为 $150 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2013 年 6 月 15 日收获冬小麦并进行秸秆还田后,于 6 月 16 日均匀撒施肥料并翻耕,施氮量为 $45 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,施肥后人工点种夏玉米并灌水 75 mm。2013 年 7 月 19 日追施氮肥,施氮量为 $90 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2013 年 8 月 13 日第二次追施氮肥,施氮量为 $30 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。以上氮肥品种均为尿素。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 N_2O 的采集与测定

N_2O 的采集与测定采用静态箱-气相色谱法。在上述 4 个重复小区内布置两种不同尺寸的静态箱采集 N_2O 。其中大静态箱尺寸:顶箱 $60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),地箱 $60 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。每个大静态箱种植 2 株玉米,当玉米高度超过 50 cm 时,在每次采气时顶箱会将其自然压弯。小静态箱顶箱尺寸为 $50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),由长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $25 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的左右对称的两部分组成,其左右两部分顶部安装有搭扣且衔接处安装有密封条,罩箱时将左右箱体对齐扣紧确保完全密封。地箱尺寸为 $50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。小静态箱顶箱顶部中央留一个 $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ (长 $\times$ 宽)的孔,使生长后期玉米茎能够通过采样箱顶部。在玉米株高不超过 20 cm 时,采样时直接将小箱顶部中央的孔用保鲜膜密封;在玉米株高超过 20 cm 时,采气时高于 20 cm 的植株部分将露出箱体,此时需要用保鲜膜(日本生产,1 个标准大气压下,其 O_2 透过率为 $2.9 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, CO_2 透过率为 $14.9 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, H_2O 透过率为 $0.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)将玉米茎和箱体连接处密封,每个小箱内种植 1 株玉米植株。安装两种尺寸的静态箱地箱时,使玉米行平行于地箱短边并处于长边正中央。试验开始前 3 d 将地箱打入土壤中 15 cm 深处,以避免打地箱产生的土壤扰动对 N_2O 排放的影响。两种规格的静态箱外层均包有 3 cm 厚的泡沫板,以保证采气期间箱内的温度变化小于 3°C 。顶箱内部装有长 4 m、内径 4.17 mm 的采气管,另一端为连接采气注射器的 3 通阀,除采气外,其他时间均保持三通阀关闭。顶箱内部顶端的两个对角装有两个 12 V 的风扇,采气时连接电源,将箱内气体混合均匀。

N_2O 的采集在当地时间上午 8:30 至 11:00 之间进行,气体采集前先将顶箱罩上地箱,将密封条压实,并用强力夹将顶箱与地箱夹紧从而保证气密性。气体采集时将顶箱罩 45 min,以罩箱开始为“0”时刻并用

50 mL 注射器采集第一针气体,随后分别在罩箱第 15 min、30 min 和 45 min 时分别抽取一次箱内气体,每次抽取 20 mL。采气时先用注射器抽取箱内气体,并缓慢推回箱内,如此重复两次,以保证所采集气体混匀。气体样品直接密封于注射器中,并带回实验室用气相色谱于 24 h 内测定完毕。施肥后,连续采集 10 d;在灌水或较大降雨($> 20 \text{ mm}$)后,连续采集 3 d;平时每 4 d 采集一次。气相色谱仪型号为岛津 GC-14B (SHIMADZU, Kyoto, 日本),安装有 ECD (Electron Capture Detector) 和 FID (Flame Ionization Detector) 检测器。采用 99.999% 的高纯 N_2 作载气,并以 10% 的 CO_2 作为补偿气,从而避免气体样品中 CO_2 浓度改变对 N_2O 浓度测定的影响。

1.3.2 温度与降雨量

静态箱顶箱安装有温度传感器(JM20, 天津今明仪器有限公司), N_2O 气体采集的开始和结束时,将其连接数字温度计(JM624, 天津今明仪器有限公司)直接读取温度数据。试验期间的气温和降雨量数据来自实验站内的气象站。

1.3.3 数据处理

N_2O 排放通量计算公式:

$$F = k_1 \times P_0 / P \times 273 / (273 + T) \times M / V \times H \times dc / dt$$

式中: F 代表气体排放通量, $\mu\text{g N}_2\text{O-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; k_1 是单位量纲之间的转换系数(1000); P_0 是箱内大气压力, hPa; P 是试验地点的标准大气压力, 1013 hPa; 因试验地的海拔接近海平面(仅有 37 m), $P_0/P \approx 1$; T 是罩箱时间内箱内的平均大气温度, $^\circ\text{C}$; M 代表 $\text{N}_2\text{O-N}$ 中 N 的摩尔质量($28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$); V 为标准状况下(273 K, 1013 hPa)的气体摩尔体积($22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$); H 是采样箱高度, m; c 是指箱内 N_2O 的浓度, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为罩箱时间, h; dc/dt 表示罩箱时间内 N_2O 浓度的变化速率, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; $P_0/P \times 273 / (273 + T)$ 是利用采气时的温度和压力校正标准状况下气体摩尔体积所采用的校正系数。

其中 dc/dt 有两种计算方法, 第一种算法为直线算法, 即采用直线回归法计算 4 个采样时间点的 dc/dt , 若 $R^2 > 0.90$ 则接受上述结果, 否则舍弃一个点的数据继续进行直接回归拟合, 若 $R^2 > 0.90$ 则接受 3 个点的拟合结果, 以上条件均未满足, 则数据被认为无效, 排放视为 0; 第二种算法为曲线并直线算法^[8-9, 18], 即分别采用二次曲线回归和直线回归来拟合 4 个点的相关关系并分别计算初始斜率。同时对两种拟合方法所得到的方程在 $P < 0.05$ 的水平上进行检测, 只有当所

得到的方程在 $P<0.05$ 的水平上达到显著时,其初始斜率才被认为有效而被接受,否则被认为无效。如果二次曲线回归和直线回归所得到的方程都达到显著,则比较二者的 R^2 和初始斜率的值,只有当二次曲线的 R^2 和初始斜率都比直线的要高时,才采纳二次曲线的值,否则用直线的初始斜率。其次,如果用4个点拟合所得到的二次曲线回归方程和直线回归方程都没有达到显著,则考虑去掉其中的一个点,然后用3个点的数据进行直线回归拟合,选择 R^2 最大的结果,同时在 $P<0.05$ 的水平上进行检测,只有当所得到的方程在 $P<0.05$ 的水平上达到显著时,其初始斜率才被认为有效而被采纳,否则被认为无效,排放视为0。最后,如果依据以上标准而获得的初始斜率小于0,那么该排放也视为0。采用线性插值法估算未测定日期的 N₂O 排放通量,然后将每日的排放量求和来计算整个夏玉米季的 N₂O 累积排放量。

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 处理,SPSS 17.0 软件进行 $\alpha=0.05$ 水平下的显著性检验,采用 Sigmaplot 12.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 试验期间的气温及降雨量

2012 年和 2013 年夏玉米季 N₂O 测定期间的气温和降雨量变化如图 1 所示。由图 1 可以看出,2012 年试验期间的大气温度整体低于 2013 年同时期的大气温度,2012 年和 2013 年 N₂O 观测期间大气日平均温度分别为 23.3 °C 和 25.8 °C。夏玉米季降雨频繁集中,2012 年和 2013 年夏玉米季试验期间降雨量分别为 430 mm 和 348 mm,两年的日最高降雨量分别

为 66 mm 和 53 mm,均低于同年夏玉米播种时的灌水量。

2.2 不同处理的 N₂O 排放通量

图 2 为 2012 年和 2013 年夏玉米季 N₂O 排放通量。由图 2 可知,在整个观测期间不同箱体结构和计算方法所得到的 N₂O 排放通量趋势一致,数值差异很小。2012 年夏玉米季期间共出现 3 个 N₂O 排放高峰:第一个 N₂O 排放高峰出现在播种灌水之后,虽然没有使用任何氮肥,但由于灌水量较大(90 mm),引起了土壤强烈的干-湿交替,从而导致 N₂O 的强烈排放;第二个和第三个 N₂O 排放高峰均出现于施肥之后,最大日排放通量分别约为 1200、1100 $\mu\text{g N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,这与施肥时高温高湿的气候条件及高施氮量有关,排放高峰出现前的两次施氮量分别为 100、150 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2013 年夏玉米季期间也出现 3 个 N₂O 排放高峰:第一个排放高峰出现于施肥并灌水后,第二个和第三个排放高峰都发生于施肥后,但由于两次施氮量均较少(分别为 90、30 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$),两个排放峰均小于 2012 年两次追肥的 N₂O 最大日排放通量。整体而言,N₂O 排放高峰的出现均与人为对土壤的扰动,即施肥、灌水和翻耕有关。夏玉米播种时灌溉量较大,2012 年和 2013 年灌水量分别为 90 mm 和 75 mm,因此,无论在不施氮(2012 年夏玉米季第一次施肥)还是施很少氮(2013 年夏玉米季第一次施肥)的情况下,灌水均导致了 N₂O 的强烈排放。相对而言,在整个夏玉米季期间,因降雨导致的 N₂O 排放高峰要弱于因灌水出现的 N₂O 排放高峰。

2.3 不同处理的 N₂O 累积排放量

表 1 为 2012 年和 2013 年夏玉米季生长期间的

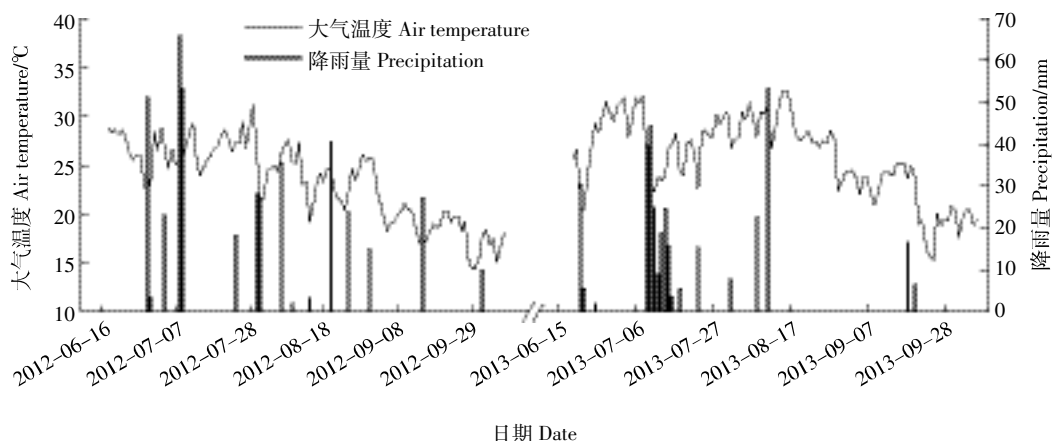
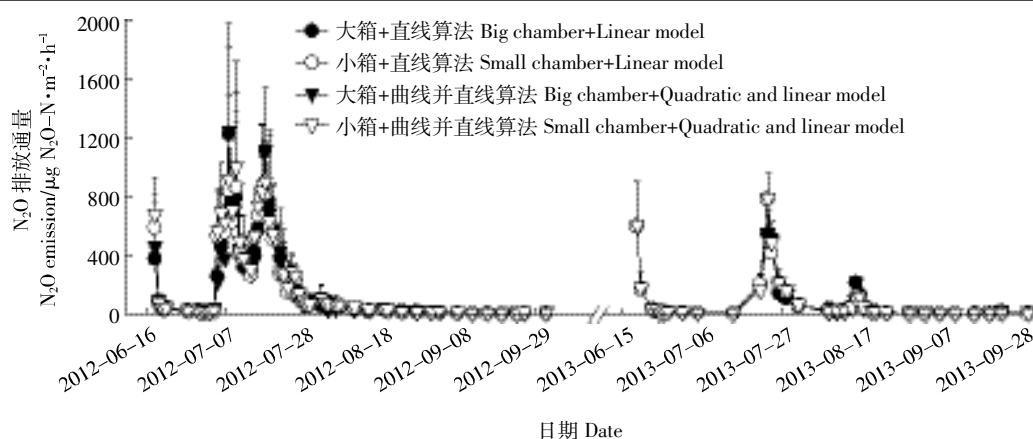


图 1 试验期间的气温和降雨量

Figure 1 Air temperature and precipitation during the summer maize season

图2 不同箱体结构和计算方法下的 N_2O 排放通量Figure 2 Dynamics of N_2O flux under different chamber size and calculation method表1 不同处理 N_2O 累积排放量 ($\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 1 N_2O cumulative emissions of different treatments ($\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{hm}^{-2}$)

年份 Year	大箱+直线算法 Big chamber+Linear model	小箱+直线算法 Small chamber+Linear model	大箱+曲线并直线算法 Big chamber+Quadratic/linear model	小箱+曲线并直线算法 Small chamber+Quadratic/linear model
2012	3413a	3340a	3568a	3627a
2013	1164a	1199a	978a	1201a

注: 同列相同字母表示 $P < 0.05$ 水平下差异不显著。

Note: The same letter in the same column denotes no significant difference in total emissions under different treatments by LSD ($P < 0.05$).

N_2O 累积排放量, 由表1可知在两年夏玉米季 N_2O 监测期间, 使用小箱以及曲线并直线算法得到的 N_2O 累积排放量, 在数值上均高于其他3个处理, 比其他处理的总排放量高5%~6%。但无论2012年还是2013年, 使用不同箱法和算法得出的 N_2O 累积排放量均无显著差异 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 箱体结构对 N_2O 排放通量的影响

由于玉米植株较高, 玉米季 N_2O 排放通量的观测不同于草地生态系统或小麦季等, 不同研究者采用了不同结构的静态箱对玉米季 N_2O 排放进行观测。有研究者完全考虑了玉米植株对 N_2O 排放的影响, 即在玉米不同的生育期采用不同高度的静态箱将玉米植株完全覆盖^[6]。但上述方法操作复杂, 更重要的是, 玉米生育后期静态箱内部体积很大, 容易造成采样不具代表性且样品浓度低, 更增加了测定结果的不确定性。因此, 一些研究者在观测农田玉米季 N_2O 排放时, 部分考虑了玉米生长, 即在玉米植株超过静态箱箱高时, 将玉米切断或压弯^[8-9, 18]。但上述的切断或压弯均会影响玉米的正常生长, 影响了玉米生长后期根系的生长、根系对水分和氮素的吸收及地上部光合产物向

土壤的供应, 最终可能会改变土壤的碳氮转化过程和 N_2O 的排放。保琼莉等^[22]对比了夏玉米根系密集区与行间土壤 N_2O 浓度, 结果表明, 玉米根系密集区和行间的根系非密集区土壤 N_2O 浓度无显著差异。上述研究结论在一定程度上验证了本研究的结果, 即在定量华北夏玉米农田土壤 N_2O 排放时, 与不破坏玉米根系正常生长的测定相比, 因罩箱时折弯或折断玉米造成的根系的生长不良, 不会影响 N_2O 排放通量的测定。主要是因为华北平原农田 N_2O 排放的主要驱动因子是施肥和灌水^[9, 23], 与以上两个因子相比, 根系对于夏玉米季 N_2O 累积排放量的影响很小。

3.2 计算方法对 N_2O 气体排放通量的影响

本研究表明, 在华北夏玉米季曲线并直线算法和直线算法得到的 N_2O 累积排放量无显著差异。为进一步证实上述结论, 我们对比了不同计算方法下得到的 N_2O 日排放通量(表2)。表中 $(F_{\text{QL}} - F_{\text{L}})/F_{\text{L}}$ 指曲线并直线算法计算得到的 N_2O 排放通量高于直线算法的 N_2O 通量的比例, 比值越大, 表明曲线并直线算法高于直线算法。从表2可以看出, 仅在利用大静态箱定量 N_2O 排放时, 会出现曲线并直线算法低于直线算法的情况, 但对应的样本数占总样本的比例可忽略不计。直线算法得到的 N_2O 排放通量, 一般会在不同程

度上低于曲线并直线算法得到的 N₂O 排放通量。由表 2 还可以看出,在 N₂O 排放通量较高时,两种算法得到的 N₂O 日排放通量很接近;而在 N₂O 排放通量较小时,曲线并直线算法得到的 N₂O 排放通量高于直线算法。我们进一步选取了两年 N₂O 测定期间大箱和小箱的最大和最小日排放量验证上述结论。如图 3 所示,无论大箱和小箱,在 N₂O 排放通量最高时,直线算法的 dc/dt 值大于曲线算法,此时曲线并直线算法要取直线算法的 dc/dt 值,因此曲线并直线算法与直线算法得到的 N₂O 排放通量结果一致;在 N₂O 排放通量最小时,曲线算法的 dc/dt 值大于直线算法,此时曲线并直线算法要取曲线算法的 dc/dt 值,因此曲线并直线算法要大于直线算法得到的 N₂O 排放通量。尽管此时曲线并直线算法的结果大于直线算法,但由

于以上结果均发生于 N₂O 排放通量较低的时候,且施肥和灌水等事件引起的排放高峰对季/周年 N₂O 排放总量占主要比例^[9,23],此时因直线算法低估的 N₂O 日排放通量对季/年的 N₂O 排放总量的影响很小。综上所述,在华北农田夏玉米季 N₂O 排放通量较高时,曲线并直线算法与直线算法得到的结果一致;而在 N₂O 排放通量较小时,曲线并直线算法高于直线算法。由于 N₂O 排放较弱时的通量对夏玉米季累积排放量贡献很小,因此,采用直线并直线或直线算法得到的华北平原夏玉米季 N₂O 累积排放量无显著差异。

4 结论

(1)在定量华北夏玉米农田土壤 N₂O 排放时,与不破坏玉米根系正常生长的小箱测定相比,因使用大

表 2 曲线并直线算法和直线算法计算 N₂O 排放通量对比
Table 2 Comparison of N₂O flux between quadratic/linear model and linear model

$(F_{Qn}-F_L)/F_L$	大箱 Big chamber($n=312$)			小箱 Small chamber($n=312$)		
	n	$R/\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$P/\%$	n	$R/\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$P/\%$
<0	5	1~6	0	0		
$=0$	248	2~1663	79	202	1~1732	25
$0<x<0.1$	24	2~1698	12	44	1~2063	37
$0.1\leq x<0.2$	8	2~867	6	39	1~2115	29
$0.2\leq x<0.3$	3	2~460	1	13	3~1163	6
$0.3\leq x<0.4$	9	4~147	1	9	3~146	1
$0.4\leq x<0.5$	8	3~233	1	5	3~503	2
$0.5\leq x<0.8$	6	3~63	0	0		

注: F_{Qn} 指曲线并直线算法计算得到的 N₂O 排放通量, F_L 指用直线算法计算得到的 N₂O 排放通量; n 、 R 、 P 指在对应 $(F_{Qn}-F_L)/F_L$ 分组范围内的样本量、日排放通量范围及日排放通量总量占夏玉米排放总量的比例。

Note: F_{Qn} denote N₂O flux calculated by quadratic and linear model; F_L denote N₂O flux calculated by linear model; n , R , P denote the sample size, daily N₂O flux and the ratio of sum of daily N₂O flux to cumulative N₂O emission of the summer maize season in the corresponding group, respectively.

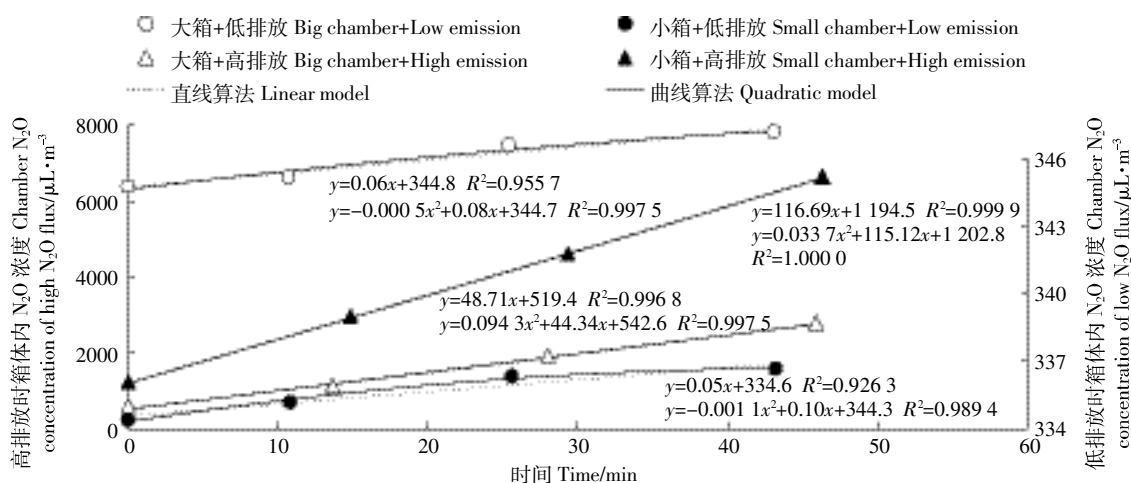


图 3 高和低 N₂O 排放通量情况下曲线算法和直线算法对比

Figure 3 Comparison between quadratic and linear model under high and low N₂O emission

箱罩箱压弯玉米造成的玉米生长不良,不会显著影响 N_2O 累积排放通量的测定结果。

(2)曲线并直线和直线算法在计算华北平原夏玉米季 N_2O 累积排放量时并无显著差异。

参考文献:

- [1] Myhre G D, Shindell F M, Bréon W, et al. Anthropogenic and natural radiative forcing [R]//Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 659–740.
- [2] Bouwman L, Daniel J, Davidson E, et al. Drawing down N_2O to protect climate and the ozone layer. A UNEP synthesis report[R]. Kenya: United Nations Environment Programme(UNEP), 2013: 17–25.
- [3] Kanter D R, Zhang X, Mauzerall D L, et al. The importance of climate change and nitrogen use efficiency for future nitrous oxide emissions from agriculture[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 094003. doi: 10.1088/1748-9326/11/9/094003
- [4] Stehfest E, Bouwman L. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 207–228.
- [5] Yao Z S, Zheng X H, Xie B H, et al. Comparison of manual and automated chambers for field measurements of N_2O , CH_4 , CO_2 fluxes from cultivated land[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(11): 1888–1896.
- [6] Qin S P, Wang Y Y, Hu C S, et al. Yield-scaled N_2O emissions in a winter wheat summer corn double-cropping system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 240–244.
- [7] Liu C Y, Wang K, Zheng X H. Responses of N_2O and CH_4 fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 839–850.
- [8] Hu X K, Su F, Ju X T, et al. Greenhouse gas emissions from a wheat-maize double cropping system with different nitrogen fertilization regimes[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176: 198–207.
- [9] Gao B, Ju X T, Su F, et al. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 42: 112–124.
- [10] Hutchinson G L, Mosier A R. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(2): 311–316.
- [11] Conen F, Smith K A. An explanation of linear increase in gas concentration under closed chamber used to measure gas exchange between soil and the atmosphere[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(1): 111–117.
- [12] Davidson E A, Savage K, Verschoor L V, et al. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 21–37.
- [13] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2): 501–511.
- [14] Barton L, Kiese R, Gatter D, et al. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(1): 177–192.
- [15] Ma Y C, Sun L Y, Zhang X X, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions from paddy soil under conventional and no-till practices using nitrification inhibitors during the winter wheat-growing season[J]. *Biological and Fertility of Soils*, 2013, 49(6): 627–635.
- [16] Zhou Y, Zhang Y, Tian D, et al. Impact of dicyandiamide on emissions of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia from agricultural field in the North China Plain[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 40: 20–27.
- [17] Kroon P S, Hensen A, van den Bulk W C M, et al. The importance of reducing the systematic error due to non-linearity in N_2O flux measurements by static chambers[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 82(2): 175–186.
- [18] Htun Y M, Tong Y A, Gao P C, et al. Coupled effects of straw and nitrogen management on N_2O and CH_4 emissions of rainfed agriculture in Northwest China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 157: 156–166.
- [19] Huang T, Ju X T, Yang H. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42247.
- [20] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [21] 岳善超. 小麦玉米高产体系的氮肥优化管理[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- [22] YUE Shan-chao. Optimum nitrogen management for high-yielding wheat and maize cropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.
- [22] 保琼莉, 巨晓棠. 夏玉米根系密集区与行间 N_2O 浓度及与氨氧化细菌和反硝化细菌数量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 15(5): 1156–1165.
- [23] BAO Qiong-li, JU Xiao-tang. The N_2O concentration and the relationships with ammonia-oxidizing bacteria and denitrifiers abundance in root zone and row of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 15(5): 1156–1165.
- [23] Ju X T, Lu X, Gao Z L, et al. Processes and factors controlling N_2O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(4): 1007–1016.