

不同通量计算方法对静态箱法测定农田 N₂O 排放通量的影响

石书静, 高志岭*

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001)

摘要:通过观测冬小麦拔节期施肥后 1 周内 N₂O 排放,研究了采用静态箱技术时,线性回归(LR)、Quad 回归和 HM 计算方法对 N₂O 排放通量的影响,同时分析了施肥(Nc)和不施肥(CK)对 N₂O 气体交换的影响。结果表明:通过 LR、Quad 和 HM 方法处理相同数据得到的 N₂O 排放通量及其特征确实存在较大的差异,由 3 种方法得到的通量变异系数最高可达到 71%;未采用 TFU 技术校正前,3 种计算方法之间的变异系数平均为 29%,而校正后则降低到 13%;同时还发现,这 3 种技术均在一定程度上低估了 N₂O 的排放通量,与校正后的排放通量相比,施肥处理中 LR、Quad 和 HM 的 N₂O 排放通量分别偏低了 14%~31%、5%~48%和 3%~62%,对照则分别偏低了 14.9%~16.0%、15.5%~35.2%和 8.4%~57.2%。因此,采用 TUF 校正方法不仅可定量分析不同计算方法之间的差异,同时也降低了 N₂O 排放通量的误差。

关键词:静态箱;冬小麦;排放通量;N₂O

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)10-2060-06

Impact of Different Flux-Calculation Methods on the N₂O Fluxes from Cropland Measured with Static Chamber Technique

SHI Shu-jing, GAO Zhi-ling*

(College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: Static chamber techniques have been used widely in characterizing N₂O fluxes from arable lands. However, it is still open to question due to the inherent underestimation of fluxes, which have caused large difficulty in reducing the uncertainty associated with the N₂O inventory and mitigation practices. In this study, the impact of LR, Quad and HM calculation techniques on the N₂O fluxes were examined through measuring N₂O fluxes from winter wheat soil with static chamber technique in one week after the N fertilization at shooting stage, and the impacts of N fertilization on N₂O fluxes were examined as well. It was found that large variance among the N₂O fluxes and patterns obtained with different calculation techniques were observed when using the same dataset, and the greatest coefficient of variation(C.V.) was up to 71%; in comparison with the C.V. of 29% before the correction, it was reduced to be 13% after the performance of TFU technique; it was also obtained that the N₂O fluxes were all underestimated, where the underestimation of N₂O fluxes by the LR, Quad and HM methods were 14%~31%, 5%~48% and 3%~62% for the N fertilized soil, and 14.9%~16.0%, 15.5%~35.2% and 8.4%~57.2% for the unfertilized soil, respectively. Therefore, the performance of the TUF technique has a great potential to minimize the difference of N₂O fluxes calculated with different techniques and reduce the uncertainty associated with N₂O fluxes, and such technique should be incorporated into the protocols of N₂O quantification in the future.

Keywords: static chamber technique; winter wheat; flux; N₂O

N₂O 是仅次于 CO₂ 和 CH₄ 的重要温室气体。N₂O 的含量虽然低于 CO₂ 和 CH₄,但其 GWP(全球增温潜

势)较大,在 100 年时间尺度内,N₂O 的 GWP 是 CO₂ 的 310 倍^[1]。而农业土壤是 N₂O 的一个重要排放源,占全球年土壤 N₂O 排放总量的 35%^[2]。

20 世纪 90 年代初至今,我国学者对不同农田生态系统 N₂O 排放进行了大量研究^[3-6],这些研究主要集中在 N₂O 排放特征、N₂O 排放的影响因素等方面。目前已发表的文献中,绝大多数研究者通常使用静态

收稿日期:2012-01-09

基金项目:国家自然科学基金(41075105)

作者简介:石书静(1984—),男,河北临西人,在读硕士研究生,主要从事土地资源方面的研究。E-mail:shishujing1202@163.com

* 通信作者:高志岭 E-mail:zhilinggao@hotmail.com

箱法来研究土壤微量气体的交换量^[7],而在计算 N₂O 排放通量时也大多采用线性模型(LR)来计算 N₂O 的通量^[8-12]。研究已经证实,当用箱式方法来测定微量气体的通量时,由于受“箱式效应”的影响,箱体内部气体浓度的升高会抑制土壤表面的气体交换,即箱体内 N₂O 的浓度并不是随时间延长呈现出线性递增趋势。若采用线性模型来计算排放通量,势必引起气体通量测定值低于真实通量值的现象^[13-14]。为了解决线性计算模型所引起的 N₂O 排放通量被低估的问题,研究者们根据 N₂O 在箱体内部的累积特点,相继开发了 HM^[15]和 Quad^[16]等非线性模型计算方法,这在很大程度上解决了上述问题。但是,由于已发表的结果所采用的计算方法不完全相同,增加了在对比分析不同结果时的难度,也直接导致不同研究中得到的气体排放通量之间无法进行比较。Venterea 等^[17]在总结上述这些方法的基础上,又提出了 TFU(Theoretical flux underestimation)校正技术。这为如何定量分析上述计算模型之间差异提供了技术支持。

在我国还没有较系统的研究来对比分析不同计算模型间的差异,因此,本研究通过测定冬小麦拔节期施肥后的 N₂O 排放通量,详细分析了 LR、Quad 和 HM 主要计算方法的差异,并验证了 Venterea 等所提出的 TFU 校正方法的有效性,这将为研究我国不同陆地生态系统温室气体排放时如何合理的选择通量数据计算方法提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于河北省保定市南市区四平庄(北纬 38°48′53.11″,东经 115°24′3″),海拔高度为 22 m,属于暖温带大陆性季风气候区,年平均气温 12℃,年降水量 550 mm。

试验起始于 2010 年冬小麦田,小麦品种为河农 6049,供试土壤为中壤质潮褐土,中等肥力,土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验设 2 个处理:CK(对照:不施肥);Nc(传统施肥:施用尿素)。每个处理 3 个重复,小区面积为 40 m²(4 m×10 m)。冬小麦的播种时间为 2010 年 10 月 6 日,行距 15 cm,小麦在生长期按农民常规管理分别进行浇水、打药、除草等。收获时间为 2011 年 6 月 20 日。Nc 整个生育期 N 施用量为 300 kg·hm⁻²,以氮肥的 1/2(N, 150 kg·hm⁻²)和磷肥(P₂O₅, 75 kg·hm⁻²)与

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the experimental soil

pH	有机质 OM/ g·kg ⁻¹	硝态氮 NO ₃ -N/ kg·hm ⁻²	全氮 Total N / g·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	速效磷 Avail. P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Avail. K/ mg·kg ⁻¹
8.4	16.5	53.8	0.92	1.49	8.9	53.2

钾肥(K₂O, 60 kg·hm⁻²)做基肥,播前撒施,然后翻耕。本次试验于 2010 年 4 月 21 日进行冬小麦拔节期追肥,追肥量为纯氮 150 kg·hm⁻²,施肥后立即进行浇水,灌水量为 60 mm。

1.3 采样和测定方法

本试验采用静态暗箱-气相色谱法,以手动采样的方式进行观测。采样箱由不锈钢板制成,规格为 30 cm×30 cm×20 cm。分别于施肥后的第 1、3、5、7 d 取气体样品,取样时间均在上午 9:00—11:00 之间进行。观测时将采样箱插入土壤 5 cm,分别在扣箱后 0、7、14、21、28 min 用 100 mL 注射器从箱内抽取 50 mL 空气,同时测定箱内气温、箱外气温和 5 cm 土层的温度。存储在注射器内的样品马上送回实验室,在 5 h 以内测定其中 N₂O 气体浓度。采用改装的 Agilent 6820 气相色谱仪分析 N₂O。经改装的 Agilent 6820 气相色谱仪装有火焰离子检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD),采用十通进样反吹阀和四通切换阀,由 ECD 分析气样中的 N₂O。利用色谱工作站将检测结果进行双通道积分并存储。

1.4 排放通量的计算方法

本研究采用了目前应用较广泛的 3 种计算模型来计算冬小麦土壤的 N₂O 排放通量,分别是线性模型(LR),Quad^[16]模型和 HM^[17]模型。

(1) 线性模型(LR)采用气体浓度 C 随时间 t 的线性回归方程,其计算公式为:

$$F = dC/dt_{t=0} \times h \times \rho \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中: F 为 N₂O 排放通量,ng·cm⁻²·h⁻¹; h 为采样箱高度,cm; T 为箱内温度,℃; ρ 为标准状况下 N₂O 气体的密度,取 1.25 kg·m⁻³; $dC/dt_{t=0}$ 为单位时间内 N₂O 浓度线性变化率,ng·cm⁻³·h⁻¹。

$$C_t = a_0 + a_1 t \quad (2)$$

C_t (ng·g⁻¹)为扣箱后 t 时刻 N₂O 浓度, a_0 (ng·g⁻¹)、 a_1 (ng·g⁻¹·min⁻¹)是方程(2)的参数,此时, $dC/dt_{t=0}$ 等于 a_1 。

(2) 用 Quad 模型计算排放通量的方法是,首先用 Microsoft Excel 2003 中 LINEST 函数计算 Quad 方程的系数,求得 $t=0$ 的斜率,然后再乘以箱体高度 h ,

即为排放通量^[16]。

$$C_t = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad (\text{条件为 } \frac{dC/dt_{t=0}}{dC/dt_{t=14}} > 0) \quad (3)$$

$b_0(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1})$ 、 $b_1(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$ 、 $b_2(\text{ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-2})$ 为方程(3)的参数, $dC/dt_{t=0}$ 等于 b_1 , $b_2 t^2$ 是 Quad 方程对 LR 方程的修正项。

(3)HM 的计算公式为:

$$F = \frac{h(C_1 - C_0)^2}{0.5t(2C_1 - C_2 - C_0)} \ln \left[\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} \right] \quad (4)$$

(条件为 $\frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_1} > 0$)

式中: t 为扣箱的总时间, 28 min; h 为采样箱高度, cm; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为扣箱后 0、14、28 min 时箱内的 N₂O 浓度, $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

本研究在上述 3 种计算方法计算的基础上, 通过应用 Venterea 建立的 TFU 校正公式^[17], 以比较各种方法之间的差异。

2 结果与分析

2.1 3 种计算方法之间 N₂O 排放特征差异

LR、Quad 和 HM 方法是目前应用静态箱技术测定生态系统痕量气体排放时应用最为广泛的计算方法。为了详细对比这 3 种方法计算之间的差异性, 本研究设置了不施肥(CK)和施肥处理(Nc)以对比分析不同 N₂O 排放通量条件下的差异。如图 1a 所示, 在施肥处理中(Nc), 发现在应用不同计算方法时, 施肥后 1 周内 N₂O 的排放特征表现出比较明显的差异。采用 LR 计算方法获得的结果表明, 从施肥后第 1 d 开始, N₂O 的排放呈现出连续下降的趋势, 而用 Quad 和 HM 方法计算的结果却显示 N₂O 排放在施肥后第 3 d 才达到最大值, 随后开始下降。由此可见, 不同计算方法所引起的排放特征的差异无疑会增加研究人员在进一步准确理解氮素在土壤中的转化过程时的不确定性。研究还发现, 在不施肥处理中, 3 种计算方法之间的差异相对较小(图 1c)。

2.2 3 种计算方法之间 N₂O 排放通量差异

本研究还发现, 在处理相同数据时, 3 种计算方法所得到的 N₂O 排放通量值在不同测定时期也存在较大差异(图 1a)。在施肥处理中, 在施肥后第 1、3、5、7 d, 这 3 种计算方法所得到的 N₂O 排放通量之间的变异系数分别为 43%、38%、9%和 12%, 基本呈现随时间递减的趋势; 而在对照处理中, 没有表现出明显增加或降低的趋势, 分别为 71%、35%、76%和 20%

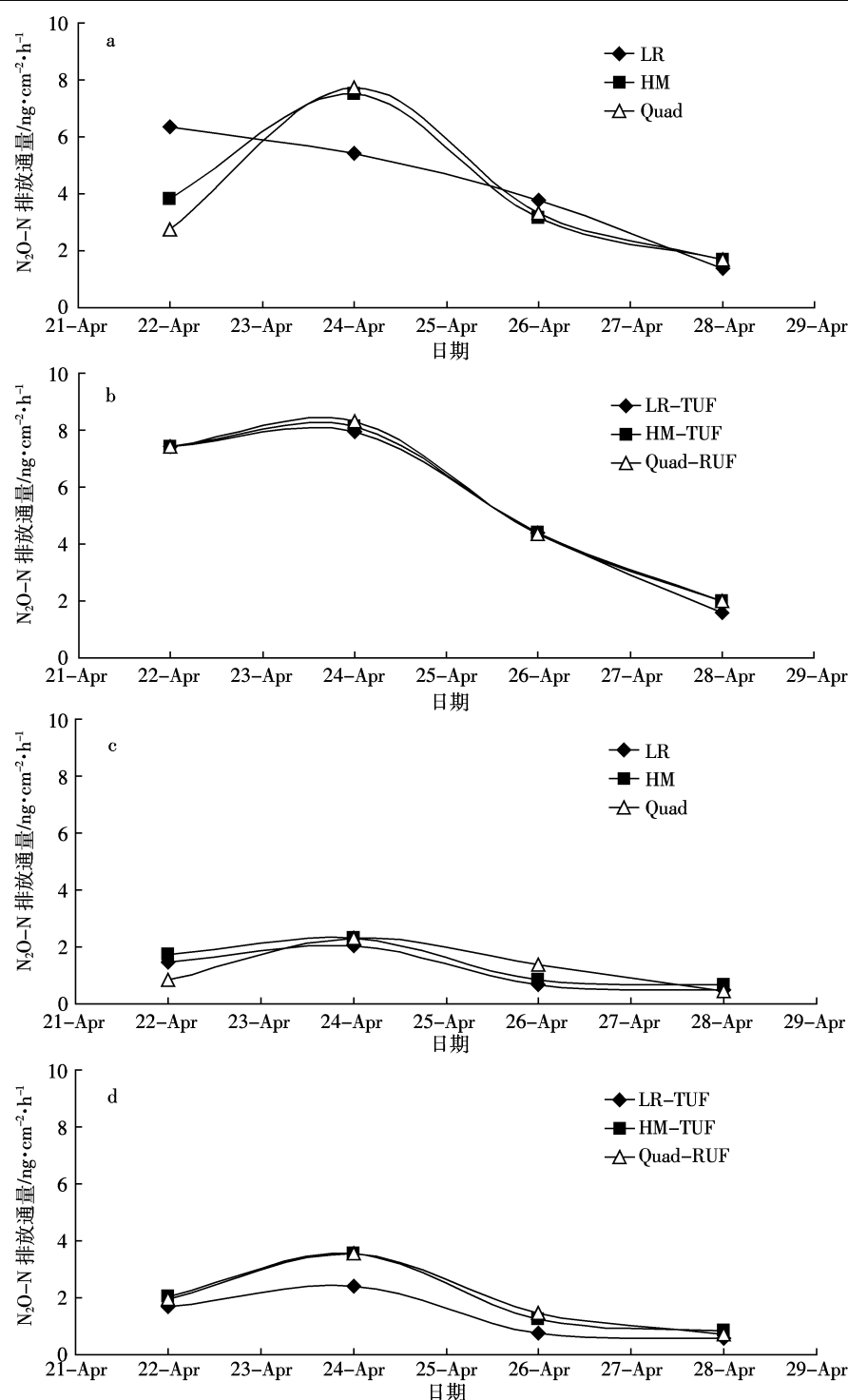
(图 1c), 但不同计算方法之间的变异系数随时间的变化不明显; 同时, 对照的变异系数和施肥处理相比有增加的趋势。除此之外, 施肥后 1 周内, LR、Quad 和 HM 3 种方法所得的 N₂O-N 排放通量平均值也存在一定的差异, 分别为 4.24、4.01、3.88 $\text{ng} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中 LR 和 HM 之间差异达到 9.3%左右。

2.3 TFU 技术对 3 种计算方法的 N₂O 排放通量的校正

由上述分析可知, 计算方法的选择不仅影响到 N₂O 排放特征的确定, 而且不同计算方法之间 N₂O 排放通量的差异也增加了今后研究者对不同研究结果进行对比分析的难度, 如何通过合适的数据处理技术降低不同计算方法之间的差异就显得尤为重要。已有的研究表明, 痕量气体在箱体内的累积受多种因素的影响, 这些因素包括土壤孔隙度、土壤 pH、土壤含水量、温度、气体的特性、箱体的高度等。因此, 如何降低上述因素所带来的误差是提高气体排放通量准确度的关键因素。

Venterea 等^[18]在充分考虑上述因素的基础上, 通过理论模拟和实际测定相结合, 提出了 TFU 校正技术, 并总结出了针对不同计算方法的具体校正参数, 如表 2 所示。本文经过采用 TFU 技术分别对 LR、Quad 和 HM 3 种技术的计算结果进行校正, 结果表明, 在施肥处理(Nc)的全部 4 次观测中, 校正后上述 3 种计算方法之间的变异系数分别为 0.0%、33.7%、0.6%和 11.9%, 分别比处理前降低了 42.69、4.13、8.86、0.42 个百分点(表 2); 处理后 3 种技术之间的变异系数平均值(4 次观测结果)从 19.89%下降到 11.54%, 变异系数的降幅达到 42.0%。对不施肥处理(CK), 经 TFU 技术处理后, 3 种技术的排放通量间的变异系数在 4 次观测时分别降低了 60.82、11.79、50.81、-0.19 个百分点; 经 TFU 处理后 3 种技术间的变异系数平均值从 50.69%下降到了 25.56%, 变异系数降幅达到 49.6%(表 2)。因此, 采用 TFU 技术的确能够大幅度降低不同计算方法之间的误差(图 2), CK 和 Nc 处理的平均降幅分别为 30.71、14.02 个百分点(表 2)。

另外, 经校正后, 施肥后采用 LR、Quad 和 HM 计算得到的 N₂O 的排放特征表现出了高度一致, 即排放高峰持续 3~5 d, 然后开始迅速降低, 并趋近于对照处理。研究还发现, N₂O 的排放通量比校正前均有大幅度升高。施肥处理中, N₂O 的排放通量分别增高了 26.0%、35.3%和 42.3%, 平均为 34.5%; 对照处理的 N₂O 排放通量分别增高了 18.4%、39.0%和 55.0%, 平

图 1 TFU 校正技术对不同计算方法的 N_2O 排放通量的影响Figure 1 Impact of TFU correction on the N_2O fluxes calculated by different calculation methods

均为 37.5%。由此可见,LR、Quad 和 HM 技术均没有很好地解决使用箱式法时痕量气体通量偏低的缺陷。

2.4 N_2O 的源汇分析

由图 1b 可知,施肥处理中, N_2O 排放通量在施肥、灌溉后急剧增加,大约在施肥后的第 3 d 达到峰值,之后 N_2O 排放通量急剧减少,1 周后 N_2O 的排放

通量已经处于一个很低的水平,基本接近于对照处理。这表明小麦田施用尿素后会导致 N_2O 的大量排放。由图 1d 也可以看出,CK 处理在灌溉后第 3 d 也出现了一个 N_2O 的排放小高峰,其出现时间与 Nc 大致相同,这也表明冬小麦田灌溉也会增加 N_2O 的排放通量。

表 2 校正前后 LR、Quad 和 HM 3 种技术的 N₂O 排放通量的变异系数Table 2 Coefficients of Variation (C.V.) among the N₂O fluxes by LR, Quad and HM without and with the TFU performance

日期	校正前变异系数/% C.V. without TFU		校正后变异系数/% C.V. with TFU		降幅(百分点) Decrease of C.V.	
	CK	Nc	CK	Nc	CK	Nc
2011 年 4 月 22 日	70.96	42.69	10.13	0.00	60.82	42.69
2011 年 4 月 24 日	35.24	37.85	23.45	33.72	11.79	4.13
2011 年 4 月 26 日	76.36	9.41	25.55	0.56	50.81	8.86
2011 年 4 月 28 日	20.23	12.29	20.42	11.87	-0.19	0.42
平均值	50.69	25.56	19.89	11.54	30.71	14.02

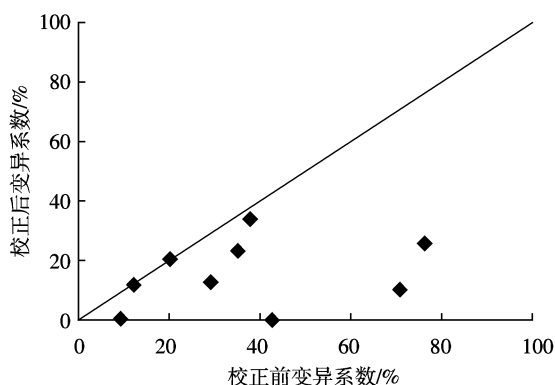


图 2 不同通量计算方法校正前及校正后的变异系数

Figure 2 Coefficients of variation before and after TFU correction

3 讨论

由于“箱式效应”的影响,本文所检验的 3 种方法计算的 N₂O 通量值均低于真实值。经校正后,采用 LR、Quad 和 HM 得到的 N₂O 的排放特征表现出了高度一致,且 N₂O 的排放通量比校正前均有大幅度升高,Nc 处理 N₂O 的排放通量分别增高了 26.0%、35.3%和 42.3%,平均为 34.5%。Venterea 等^[18]的研究也表明,通过应用 TFU 校正技术,LR 和 Quad 计算模型所得的整个生长季 N₂O 排放通量平均分别比校正前提高了 22%和 8%。与之相比,本研究所得的校正效果更为明显,这种可能是由于试验地土壤理化特性和肥料用量的差异造成的。

另外,由图 1 可明显看出,追肥处理(Nc)N₂O 的排放速率迅速增加,追肥不仅为植株提供了生长所需的养分,也为土壤微生物提供了充足的反应底物,所以造成 N₂O 的大量排放。也有研究表明,施肥对农田 N₂O 的排放有显著影响,随着氮肥施用量的增加,农田 N₂O 的排放通量也以直线^[19-20]或曲线趋势增加^[21-23]。同时,CK 处理在灌水后,N₂O 排放速率也相应的增加,这是由于旱地土壤含水量与土壤中的硝化作用和反硝化

作用具有较明显的相关性,N₂O 排放通量与土壤含水量显著正相关,直接影响着土壤 N₂O 的排放量^[24-26]。

4 结论

本研究通过比较 LR、Quad 回归和 HM 计算方法对冬小麦田 N₂O 排放通量的影响,发现不同计算方法之间确实存在较大的差异,这不仅表现在 N₂O 排放特征的差异上,而且这 3 种计算方法所得的 N₂O 排放通量之间的变异系数较高,最高可达到 71%。而在使用 TFU 技术校正后,3 种计算方法之间的变异系数平均值从 29%降低到 13%;同时还发现,这 3 种技术均在一定程度上低估了 N₂O 的排放通量,校正后施肥和对照处理的 N₂O 的平均排放通量分别升高了 35.5%和 37.5%。因此,采用 TUF 校正方法不仅能够大幅度降低不同计算方法之间的通量差异,同时也降低了 N₂O 排放通量计算的误差。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change, Radiative forcing of climate change: The scientific basis (IPCC Third Assessment Report) [M]. Cambridge, United Kingdom and New York. Cambridge University Press, 2001: 212.
- [2] Kroeze C, Mosier A, Bouwman A F. Closing the global N₂O budget: A retrospective analysis 1500–1994 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(1): 1–8.
- [3] 陈冠雄, 黄国宏, 黄 斌, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放及养萍和施肥的影响 [J]. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 378–382.
CHEN Guan-xiong, HUANG Guo-hong, HUANG Bin, et al. CH₄ and N₂O emission from a rice field and effect of Azolla and fertilization on them [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 378–382.
- [4] 于克伟, 陈冠雄, 杨思河, 等. 几种旱地农作物在农田 N₂O 释放中的作用及环境因素的影响 [J]. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 387–391.
YU Ke-wei, CHEN Guan-xiong, YANG Si-he, et al. Role of several up-land crops in N₂O emission from farmland and its response to environmental factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 387–391.
- [5] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd, 等. 菜地不同施氮量下 N₂O 逸出量的

- 研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2002, 28(2):73-77.
- LIANG Dong-li, TONG Yan-an, Ove Emteryd, et al. N_2O losses from vegetable field of applying different amounts of NO_3-N [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2002, 28(2):73-77.
- [6] 庞军柱, 王效科, 牟玉静, 等. 黄土高原冬小麦地 N_2O 排放[J]. 生态学报, 2011, 31(7):1896-1903.
- PANG Jun-zhu, WANG Xiao-ke, MU Yu-jing, et al. Nitrous oxide emissions from winter wheat field in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7):1896-1903.
- [7] 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, Nutr[J]. *Cycling Agroecosyst*, 2006, 74:207-228.
- [8] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1186-1191.
- YE Xin, LI Jun, WANG Ying-hong, et al. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1186-1191.
- [9] 高志岭, 陈新平, 张福锁, 等. 农田土壤 N_2O 排放的连续自动测定方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1):64-70.
- GAO Zhi-ling, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, et al. Continuous-automatic method for measuring N_2O emission for agricultural soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1):64-70.
- [10] 杨劲峰, 韩晓日, 战秀梅, 等. 不同施肥处理对棕壤 N_2O 排放量的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(2):560-563.
- YANG Jin-feng, HAN Xiao-ri, ZHAN Xiu-mei, et al. Effects of different fertilization on N_2O emission in brown field[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2):560-563.
- [11] 陈卫卫, 王毅勇, 赵志春, 等. 三江平原春小麦农田生态系统氧化亚氮通量特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2777-2782.
- CHEN Wei-wei, WANG Yi-yong, ZHAO Zhi-chun, et al. Characteristics of nitrous oxide flux in spring wheat field ecosystem in Sanjiang Plain of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12):2777-2782.
- [12] 邱伟红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2238-2243.
- QIU Wei-hong, LIU Jin-shan, HU Cheng-xiao, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2238-2243.
- [13] Healy R W, Striegl R G, Russell T F, et al. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: Identification of physical processes[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60:740-747.
- [14] Pedersen A R, Petersen S O, Vinther F P. Stochastic diffusion model for estimating trace gas emission with static chamber[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, 65:49-58.
- [15] Hutchinson G L, Mosier A R. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1981, 45:311-316.
- [16] Wagner S W, Reicosky D C, Alessi R S. Regression models for calculating gas fluxes measured with a closed chamber[J]. *Agron J*, 1997, 89:279-284.
- [17] Venterea R T. Simplified method for quantifying theoretical underestimation of chamber-based trace gas fluxes[J]. *J Environ Qual*, 2010, 39:126-135.
- [18] Venterea R T, Dolan M S, Ochsner T E. Urea decreases nitrous oxide emissions compared with anhydrous ammonia in a minnesota corn cropping system[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2010, 74:407-418.
- [19] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado[J]. *J Environ Qual*, 2006, 35(4):1584-1598.
- [20] Halvorson A D, Grosso S D, Reule C A. Nitrogen, tillage, and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems[J]. *J Environ Qual*, 2008, 37(4):1337-1344.
- [21] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data[J]. *Glob-al Biogeochem Cycles*, 2002, 16(4):1080-1088.
- [22] Meswinney C P, Robertson G P. Nonlinear response of N_2O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system[J]. *Glob Change Biol*, 2005, 11(10):1712-1719.
- [23] Grant R F, Pattey E, Goddard T W, et al. Modeling the effects of fertilizer application rate on nitrous oxide emissions[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70(1):235-248.
- [24] 刘运通, 万运帆, 林而达, 等. 施肥与灌溉对春玉米土壤 N_2O 排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):997-1002.
- LIU Yun-tong, WAN Yun-fan, LIN Er-da, et al. N_2O flux variations from spring maize soil under fertilization and irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):997-1002.
- [25] Ponce M A, Boeckx P F, Gutierrez M, et al. Influence of water regime and N availability on the emission of nitrous oxide and carbon dioxide from tropical, semi-arid soils of Chiapas, Mexico[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1):137-151.
- [26] Laura S M, Vallejo A, Dick J, et al. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(1):142-151.