

肥水管理方式对蔬菜田 N_2O 释放影响的模拟研究

黄丽华¹, 沈根祥¹, 顾海蓉¹, 钱晓雍¹, 施兴荣², Maria L. Gullino³

(1.上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2.上海上实现代农业开发有限公司, 上海 202183; 3.意大利都灵大学农业环境能力创新中心, 都灵 10095)

摘要: 通过田间静态箱监测和 DNDC 模型模拟的方法, 对比研究了崇明岛东滩蔬菜田在常规肥水管理和精确滴灌施肥方式下 N_2O 的排放情况, 从排放特征、全年通量、单位氮肥 N_2O 损失率以及单位作物产量排放量等方面分析了不同肥水管理方式对旱田土壤 N_2O 排放的影响。结果表明, 基于土壤和作物养分平衡管理的精确滴灌施肥技术, 由于减少了氮肥施用量并改进了肥水分配方式, 提高了肥料的利用效率, 在保持农作物产量的基础上减少了 N_2O 的排放。与常规肥水管理方式相比, 滴灌施肥区 2006 年和 2007 年的 N_2O 排放通量分别减少 6.2 和 6.8 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 单位氮肥 N_2O 损失率明显降低, 2006 年和 2007 年单位产量排放量分别削减 53.2% 和 58.9%。

关键词: 精确滴灌施肥; DNDC 模型; 单位氮肥 N_2O 损失率; 单位产量 N_2O 排放量

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)06-1319-06

Simulation of Some Impacts of Fertilization and Water Management on Nitrous Oxide Emissions from Vegetable Field

HUANG Li-hua¹, SHEN Gen-xiang¹, GU Hai-rong¹, QIAN Xiao-yong¹, SHI Xing-rong², Maria L. Gullino³

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. SIIC Modern Agriculture Development Co. Ltd, Shanghai, 202183, China; 3. AGROINNOVA, University of Torino, Grugliasco (TO), 10095, Italy)

Abstract: The emissions of nitrous oxide from vegetable fields were studied through the field monitoring with the static chamber method and the simulation with DNDC model. The impacts of drip fertigation on nitrous oxide emission were compared to the conventional irrigation and fertilization strategy in terms of emission characteristics, annual fluxes, losses rates of nitrogen fertilizers, and emission flux per crop yields. It was showed that with the drip fertilizer irrigation, due to the saving of the nitrogen fertilizers and the increase of fertilizer utilization efficiency, the N_2O emission flux was reduced significantly without compromising crop yields. Compared with the conventional fertilization and irrigation strategy, the N_2O flux was reduced by 6.2 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and 6.8 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in 2006 and 2007, respectively, and the loss rate of nitrogen fertilizer was lowered as well. Meanwhile, the N_2O flux per unit crop yield was decreased by 53.2% and 58.9% in 2006 and 2007, respectively.

Keywords: drip fertigation; DNDC model; loss rate of nitrogen fertilizer; N_2O flux per unit crop yield

随着全球温室效应的不断增强, 全球气候变化成为 21 世纪人类面临的重大问题之一^[1]。在人类活动所排放的温室气体中, CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是其中最为重要的 3 种温室效应气体。

由于 N_2O 在大气中的驻留时间长达 140 a, 增温潜势是等质量 CO_2 的 310 倍, 同时对平流层臭氧层有破坏作用, 使其成为人们关注和研究的热点。在已知的 N_2O 全球排放源中, 农业活动是其中最为重要的人

为释放源。研究表明, 农田土壤对全球 N_2O 人为排放的贡献率高达 70%^[2]。农田土壤 N_2O 排放量除取决于气候和土壤性状等自然因素外, 还受农业活动施肥、翻耕和灌溉的显著影响^[3-4]。在保持农作物产量的前提下, 研究有利于减少 N_2O 排放的肥料施用和水分管理措施, 对于全球温室气体减排有着非常重要的意义。

近年来, 国内外进行了大量与农田温室气体排放相关方面的研究。国内过去以研究稻田 CH_4 排放为主^[5-6], 近年来对旱田 N_2O 排放进行了基础性的研究工作^[7-8]。国外目前着重研究不同肥水管理方式和不同农业体系对农田 N_2O 排放的影响, 致力于探讨有利于 N_2O 减排的最佳农业管理措施^[9-11], 而国内则报道

收稿日期: 2008-09-05

基金项目: 中国-意大利环境保护合作项目

作者简介: 黄丽华(1978—), 女, 工程师。E-mail: huanglh@saes.sh.cn

通讯作者: 沈根祥 E-mail: shengx@saes.sh.cn

较少。

DNDC 模型是目前国际上最为成功的农田温室气体模拟模型之一,受到美国农业部推荐使用。该模型由两个部分组成:第一部分包含土壤气候、植物生长和有机质分解等 3 个子模型,其作用是根据输入的气象、土壤、植被、土地利用和农田耕作管理数据预测植物-土壤系统中诸环境因子的动态变化;第二部分包含硝化、脱氮和发酵等 3 个子模型,其作用是由土壤环境因子来预测这 3 个微生物参与的化学反应的速率。

本文以蔬菜田为研究对象,在利用静态箱田间监测结果对 DNDC 模型进行初步验证的基础上,根据 DNDC 模型模拟结果,比较试验田在当地常规肥水管理方式和精确滴灌施肥方式下 N_2O 的排放特征、排放通量、单位氮肥 N_2O 损失率和单位产量 N_2O 排放量等,分析精确滴灌施肥方式在减少农田 N_2O 排放方面的效果,探讨适用于农田 N_2O 减排的肥水管理措施和方式。

1 试验基地及试验方法

1.1 试验基地概况

试验在上海上实东滩现代农业园区(东经 $120^{\circ}57.21'$,北纬 $31^{\circ}30.43'$)进行。崇明岛东滩位于北亚热带南缘的沿海地区,具有明显的季风气候特点,年平均气温 $15\sim 16^{\circ}\text{C}$,平均降水量为 $1\,166.8\text{ mm}$ 。农田土壤基本理化性质如表 1 所示。

试验期为 2006 和 2007 年,蔬菜田面积为 1 hm^2 ,南北方向开沟作畦,畦面宽 4 m ,沟宽 30 cm 。蔬菜田一半面积为对照区,采用当地常规施肥灌溉方式;另一半为精确滴灌施肥区,采用自动化精确滴灌施肥技术,每畦铺设 1 条滴灌带,并覆盖地膜,滴头间距为 30 cm 。

1.2 试验田施肥与灌溉情况

常规区每茬作物施用基肥和 1~2 次追肥,采用撒施和条施等常规方式,肥料施用品种和施用量与常规生产保持一致。常规区主要在施用基肥后灌溉,并在

夏季高温作物需水的时候适当补充水分,灌溉方式为浇灌。滴灌施肥区除基肥为撒施和条施外,追肥基本采用滴灌施肥方式。在测定土壤养分含量的基础上,应用 Stanford 方程^[12]估算滴灌施肥区的养分投入水平,在确定各种养分的用量和相对比例后,选择可溶于水且在水溶液中混合时不发生沉淀的肥料品种,并根据养分目标比例计算其配比。滴灌施肥区除施用基肥时浇灌一定量的水外,其余灌溉基本伴随施肥进行,灌溉水量根据不同作物品种对水分的要求而定。蔬菜田在 2006 年和 2007 年的农作物轮作、灌溉和施肥情况如表 2 所示。

1.3 田间 N_2O 排放监测

蔬菜田间 N_2O 排放监测试验在 2007 年西瓜种植周期内进行,在常规区与滴灌施肥区内分别设置 3 个监测点,利用静态箱/气相色谱法对不同处理区所排放的 N_2O 进行采样和分析。

静态箱是一个 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的无底有机玻璃箱,箱内装有由蓄电池驱动的小风扇,箱体中部留有两个小孔,并用硅胶塞封紧,其中一个插有温度计,另一个用于采样。采样时,将采样箱的基脚插入土壤 10 cm 处,将箱放在基脚上,用水密封箱与基脚之间的缝隙,插入温度计并启动风扇,分别在 0 、 15 、 30 和 45 min 时,用注射器通过采样孔抽取 20 mL 气样,注入气体采样袋中密封保存,立即送往实验室进行 N_2O 浓度分析。田间采样在早上 $8:00\sim 10:00$ 进行,使测得的 N_2O 排放通量尽量能代表当天的平均情况^[10],采样时同时测定气温和土壤温度。使用岛津 GC-14B 分析气样的 N_2O 浓度,检测器为 ECD(350°C),载气为氩气,Porapak Q 柱($80/100$ 目, 3 m),柱温 65°C 。

N_2O 排放通量的计算公式为 $F=p\times H\times \Delta C/\Delta t\times 273/(273+T)\times 10^6$ 。式中: F 为温室气体排放通量, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$; p 为标准状态下温室气体的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; H 为静态箱高度, m ; $\Delta C/\Delta t$ 为单位时间静态箱内温室气体浓度的变化量,以体积比计, h^{-1} ; T 为静态箱内温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 N_2O 排放通量模拟

在田间实测的基础上,利用 DNDC 模型对蔬菜田在 2006 年和 2007 年的 N_2O 排放通量进行模拟。模型所需的温度和降水等参数来自崇明气象局和田间实测值;农田土壤基本理化性质均为实测值,如表 1 所示;农作物类型、种植时间、生物量、主要田间管理措施等来自试验期内的田间档案,具体见表 2。

表 1 蔬菜田土壤基本理化性质

Table 1 Fundamental physical & chemical properties of the soil in vegetable field

土壤质地	粘粒含量/% ($<0.002\text{ mm}$)	pH	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机质/ %	$\text{NO}_3^-/\text{N}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{NH}_4^+/\text{N}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
粉砂壤土	19.98	7.83	1.38	1.1	51.5	25.4

表 2 蔬菜田常规与滴灌施肥处理区氮肥和灌溉情况

Table 2 Nitrogen fertilization & irrigation in conventional and drip fertigation plots in vegetable field

时间	作物	处理	氮肥/kg N·hm ⁻²	灌溉/mm
2006	大豆 5/1—7/28 ; 玉米 8/19—11/6	常规	总计 525.6	总计 29.9
		对照	3/22 :168.8 ,有机肥 ,撒施 3/22 :51.0 ,碳铵 ,撒施 6/16 :33.8 ,复合肥 , 沟施 8/19 :67.0 ,尿素、复合肥 ,撒施 8/30 :45.2 ,尿素、磷酸二胺 ,撒 施 9/30 :44.8 ,尿素 ,撒施 :10/3 :115 ,尿素、复合肥 ,穴施	8/20 和 8/21 :各 10 ,浇灌 8/22 :9 ,浇灌 ; 8/28、8/31、9/7、9/23、10/2 和 10/8 :各 0.15 ,浇灌
		滴灌	总计 379.9	总计 29.4
		施肥	3/22 :168.8 ,有机肥 ,撒施 4/17 :10.4 ,硝酸钾 ,撒施 8/14 :100.7 ,碳 铵 ,撒施 8/17 :50 ,碳铵 条施 9/29、9/30 和 10/1 :各 16.7 ,尿素 ,滴灌	8/17 :0.15 ,浇灌 8/18 和 8/23 :各 7 ,浇 灌 8/28、9/4、9/13 和 10/8 :各 1.1 ,滴灌 ; 9/29、9/30 和 10/1 :各 3.6 ,滴灌
2007	西瓜 4/10—7/26 ; 玉米 8/22—11/20	常规	总计 476	总计 23
		对照	3/26 :112.5 ,有机肥 ,撒施 3/28 :49.5 ,复合肥 ,条施 5/12 :4.5 ,复合 肥 ,撒施 6/2 :28.5 ,磷酸二胺 ,穴施 6/17 :55.5 ,尿素、复合肥 ,穴施 ; 8/30 :34.5 ,尿素 ,撒施 9/5 :69 ,尿素 ,撒施 9/25 :90.5 ,磷酸二胺、尿 素 条施 :10/2 :31.5 ,硫酸铵 条施	5/12 :2 ,浇灌 8/24 :14 ,浇灌 8/26 :7 , 浇灌
		滴灌	总计 303.7	总计 40.7
		施肥	3/26 :50 ,复合肥 ,撒施 5/7 :5.65 ,尿素、磷酸脲、硝酸钾 ,滴灌 5/14 和 5/29 :各 8.6 ,尿素、磷酸脲、硝酸钾 ,滴灌 5/21 :4.56 ,尿素、磷酸 脲 ,滴灌 6/9、6/18 和 6/23 :各 3.85 ,尿素、磷酸脲、硝酸钾 ,滴灌 7/1 、7/11 和 7/18 :各 1.69 ,硝酸钾 ,滴灌 8/19 :105 ,尿素、磷酸二胺、 硝酸钾 ,撒施 8/21 :64 ,尿素、硝酸钾 ,撒施 9/21、9/27 和 10/2 :各 13.6 ,硫酸铵、硝酸钙 ,滴灌	5/7、5/14、5/21、5/29、6/9、6/18、6/23、 7/1、7/11 和 7/18 :各 1.9 ,滴灌 8/24 : 11.4 ,浇灌 9/21、9/27 和 10/2 :各 3.42 , 滴灌

2 试验结果与讨论

2.1 田间监测结果与模型模拟结果对比

作为国际上目前最为通用的农田温室气体模拟模型,DNDC 模型在国内外已经得到了广泛的应用和验证^[13-14]。为了评价该模型在模拟试验基地气候土壤条件下 N₂O 排放的适用性,利用西瓜种植期内的田间监测结果对 DNDC 模型模拟结果进行初步验证。

在西瓜种植期内,利用静态箱法分别在常规对照区和滴灌施肥区进行了 9 次监测,监测结果和对应日期的 DNDC 模拟结果的相关性分析如图 1 所示。由图可见,常规对照区和滴灌施肥区模拟值与实测值的相关系数分别为 0.88 和 0.85,经相关系数显著性 *t* 检

验,相关系数达到非常显著性水平($P<0.01$ $n=9$),表明 DNDC 模型较好地模拟了农田 N₂O 的排放通量和变化趋势。因此,在后面的讨论中着重以 DNDC 模拟结果作为讨论的依据。

2.2 常规肥水管理与滴灌施肥条件下 N₂O 排放特征

2006 和 2007 年蔬菜田常规区的 N₂O 排放模拟曲线如图 2 所示,图中还同时标示了土壤温度(−5 cm)、降雨量和氮肥施用时间。从图中可以看出,农田 N₂O 的排放主要表现为大小不一的释放峰,呈明显的季节分布,这主要受气候和土壤等环境条件的影响。一般来说,温度越高,N₂O 排放越强烈。另外,干湿交替的土壤条件较有利于 N₂O 的排放^[15]。因此,蔬菜田 N₂O 排放主要集中在气温较高、雨水较多的 4 月至 9

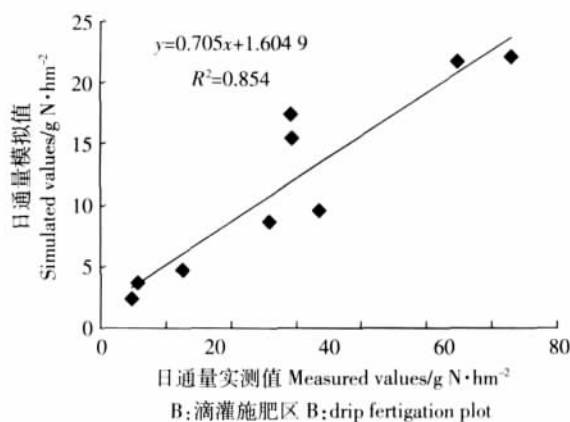
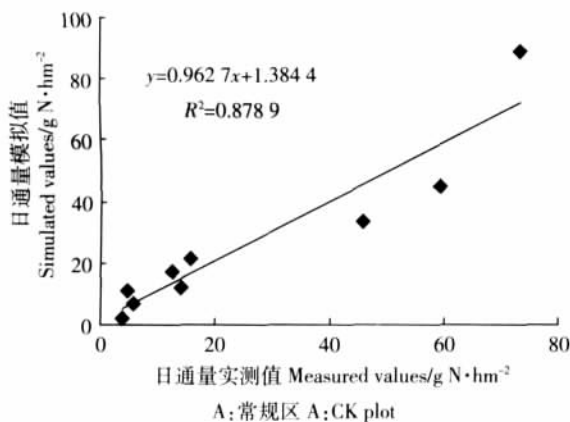


图 1 常规区和滴灌施肥区 N₂O 日通量模拟值与实测值相关性
Figure 1 Correlation of simulated and measured values of N₂O daily flux

月,以 7 月至 9 月的排放最为强烈,而在寒冷干燥的秋冬两季的排放通量很低。

除环境条件外,施肥是影响农田 N_2O 排放的另一个主要因素,也是最重要的人为因素之一^[16]。由于氮肥的施用能在短时间内增加土壤中的速效氮含量,提高了硝化-反硝化反应的底物浓度,因此能促进 N_2O 的排放。如图 2 所示,常规区的每次施肥都能形成 N_2O 的释放峰,释放峰的大小取决于氮肥施用量的多少,以及施肥前后的温度和湿度情况。每年的 6 月至 9 月,高温多雨加上密集的施肥,使得 N_2O 的排放最为强烈。常规区 2006 年和 2007 年的 N_2O 年排放通量分别为 12.0 和 $12.9 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

蔬菜田滴灌施肥区的 N_2O 排放模拟曲线如图 3 所示,图中标示了土壤温度(-5 cm)、降雨量和氮肥施用时间。与常规区相似,受气候和土壤环境条件的影响,滴灌施肥区的 N_2O 排放也呈明显的季节分布,主要集中在 4 月至 9 月。但是,该区的 N_2O 的释放峰比常规区稀疏,释放强度总体也比常规区低。如前所述,氮肥施用是影响 N_2O 排放的重要因素,而常规区与滴灌施肥区在氮肥管理上有着明显的区别。从表 2 可知,2 a 间滴灌施肥区的氮肥施用总量比常规区少 32%,而施肥次数达到 23 次,明显多于常规区的 16 次,肥料减量以及施肥次数的增多使得该区每次所施用的氮肥量都远低于常规区。同时,精确滴灌施肥系

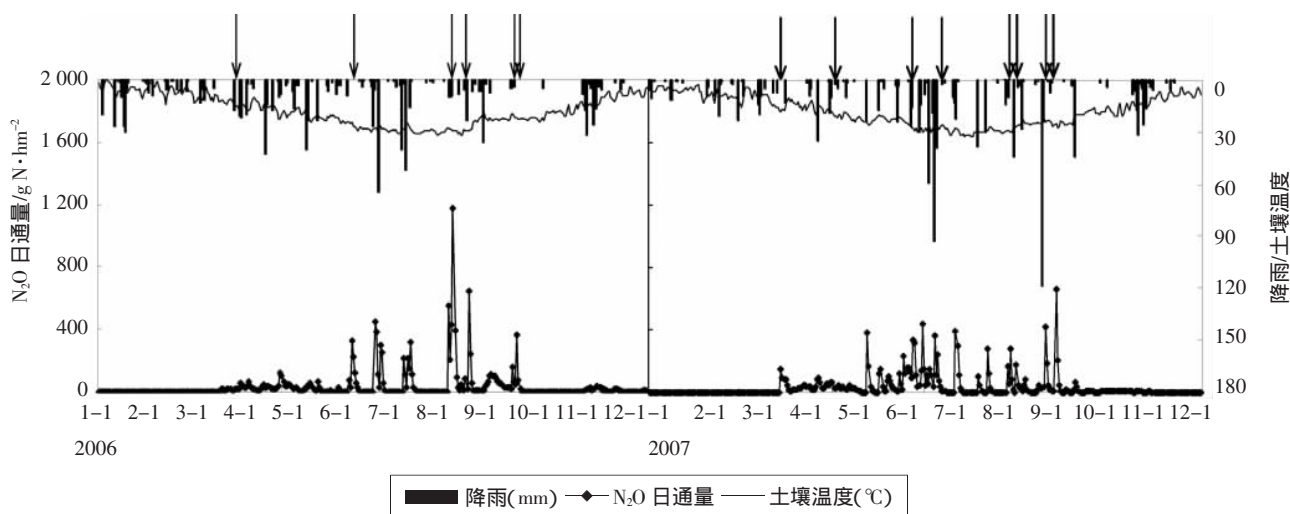


图 2 蔬菜田常规区 N_2O 日排放通量模拟曲线(箭头对应于氮肥施用过程)

Figure 2 Simulated curve of N_2O daily flux in CK plot of vegetable field

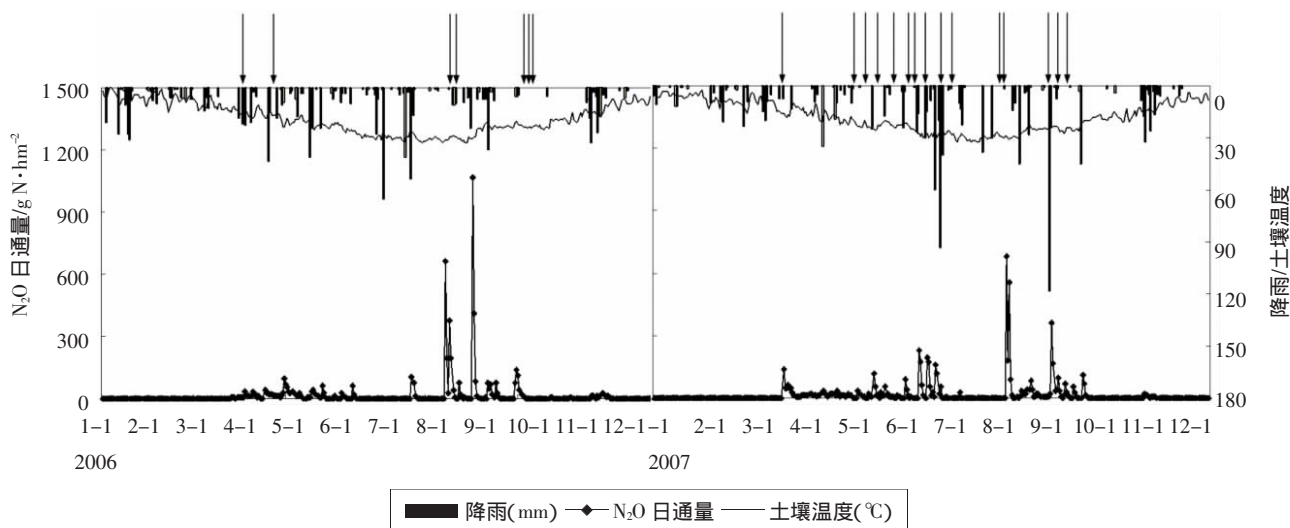


图 3 蔬菜田滴灌施肥区 N_2O 日排放通量模拟曲线(箭头对应于氮肥施用过程)

Figure 3 Simulated curve of N_2O daily flux in drip fertigation plot of vegetable field

统的应用使得该区的肥料能以溶解状态直接输送到作物根部,更利于吸收,因此氮肥利用率更高。根据 DNDC 模拟结果,滴灌施肥区 2006 年和 2007 年的 N_2O 年排放通量分别为 5.8 和 6.9 $kg\ N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。由此可见,少量多次施肥以及精确滴灌施肥系统的使用提高了氮肥的利用效率,减少了损失,从而有效地削减了 N_2O 的排放。

2.3 常规肥水管理与滴灌施肥条件下单位氮肥 N_2O 损失率

由 2.2 的分析可得到蔬菜田 2 a 的 N_2O 排放通量及滴灌施肥区的削减率,如表 3 所示。由表中可知,在 2006 年和 2007 年,滴灌施肥区的 N_2O 排放量削减显著,削减率分别为 51.7%和 52.7%。根据 N_2O 排放通量和表 1 中列出的氮肥施用量,得到了蔬菜田的单位氮肥 N_2O 损失率。该损失率反映了农田氮肥以 N_2O 方式排放的损失比例,2006 年常规区和滴灌施肥区的单位氮肥损失率分别为 2.3%和 1.5%,2007 年两区分别为 2.7%和 2.0%,滴灌施肥区的氮肥损失率明显比常规区低($P<0.05$)。由此可见,肥料分散施用及滴灌施肥系统的应用可有效降低氮肥的 N_2O 损失率,在节省氮肥用量的同时减少施肥对温室效应的影响。

表 3 2006 年与 2007 年 N_2O 排放通量及单位氮肥损失率
Table 3 N_2O fluxes and loss rate of nitrogen fertilizer (as N_2O) of vegetable field in 2006 & 2007

处理	2006 年		2007 年	
	排放通量/ $kg\ N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	单位氮肥 损失率 %/%	排放通量/ $kg\ N \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$	单位氮肥 损失率 %/%
常规对照	12.0	2.3	12.9	2.7
滴灌施肥	5.8	1.5	6.1	2.0
削减率/%	51.7	—	52.7	—

注: * 单位氮肥 N_2O 损失率 = N_2O 排放通量/氮肥施用量。

2.4 常规肥水管理与滴灌施肥条件下单位产量 N_2O 排放量

2006 年和 2007 年蔬菜试验田各目标农作物产量以及结合表 3 计算得到的单位产量 N_2O 排放量如表 4 所示。从表中可知,虽然滴灌施肥区相对于常规区削减了 30%左右的氮肥量,但 2 a 的生产试验表明,滴灌施肥区的农作物产量与常规区基本持平甚至略有提高。同时,由于滴灌施肥区的 N_2O 排放通量显著低于常规区,因此滴灌施肥区的单位作物产量 N_2O 排放量比常规区大幅削减。如表中所示,2006 年每生产 1 kg 农作物干物质,常规区排放 2.82 g $N(N_2O)$,而滴灌施肥区仅排放 1.32 g $N(N_2O)$,削减率达 53.2%,

表 4 2006 年与 2007 年蔬菜田单位产量 N_2O 排放量

Table 4 N_2O emission flux per crop yield of vegetable field in 2006 & 2007

处理	农作物产量/ $kg\ dry\ matter \cdot hm^{-2}$				单位产量 N_2O 排放量/ $g\ N \cdot kg^{-1}\ dry\ matter$	
	大豆	玉米 1	西瓜	玉米 2	2006 年	2007 年
常规对照	1 724a*	2 543a	2 159a	2 706a	2.82a	2.65a
滴灌施肥	1 693a	2 710b	2 372b	3 212b	1.32b	1.09b

注: * 数值后面英文字母相同表示无显著差异,不同表示差异达到 $P<0.05$ 的显著水平;玉米 1 和玉米 2 分别代表 2006 和 2007 年的玉米产量。

2007 年削减率更达到 58.9%。

3 结论

(1)DNDC 模型模拟结果与田间静态箱实测结果对比分析表明, DNDC 模型能较好模拟崇明岛东滩蔬菜田的 N_2O 排放情况。对蔬菜田 N_2O 排放的模拟曲线进行分析,结果表明旱田 N_2O 排放主要受到气候、土壤和田间管理的影响,在气候和土壤条件相同的情况下,通过减少氮肥施用量和改进肥水管理方式,可有效减少 N_2O 的排放。

(2)DNDC 模拟结果表明,在氮肥减量 30%左右并应用精确滴灌施肥系统进行肥水管理的情况下,2006 年(大豆-玉米轮作)和 2007 年(西瓜-玉米轮作)的农田 N_2O 排放通量比常规肥水管理的 N_2O 排放分别减少 51.7%和 52.7%,单位氮肥 N_2O 损失率显著降低。

(3)与常规肥水管理方式相比,基于养分平衡管理的精确滴灌施肥技术可在保证作物单产的同时,有效削减单位作物产量的 N_2O 排放量。2006 年和 2007 年滴灌施肥区的单位作物产量 N_2O 排放量比常规区分别减少 1.50 和 1.56 $g\ N \cdot kg^{-1}$, 削减率分别达到 53.2%和 58.9%。

参考文献:

- [1] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years[J]. *Science*, 2000, 289: 270-277.
- [2] Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystem and the atmosphere[C]//Bouwman A F. ed. *Soils and Greenhouse Effect*. Wiley, New York, 1990: 61-127.
- [3] 张振贤, 华 璐, 尹逊霄, 等. 农田土壤 N_2O 的发生机制及其主要影响因素[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 114-120. ZHANG Zhen-xian, HUA Luo, YIN Xun-xiao, et al. Nitrous oxide emis-

- sion from agricultural soil and some influence factors[J]. *Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition)*, 2005, 26(3) :114-120.
- [4] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生和排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, 18(5) :1-5.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impacts of temperature on N_2O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5) :1-5.
- [5] 熊效振, 沈壬兴, 王明星, 等. 太湖流域单季稻的甲烷排放研究[J]. *大气科学*, 1999, 23(1) :9-18.
- XIONG Xiao-zhen, SHEN Ren-xing, WANG Ming-xing, et al. Methane emission from rice paddy field of Taihu Area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(1) :9-18.
- [6] 黄国宏, 陈冠雄, 吴 杰, 等. 东北典型旱作农田 N_2O 和 CH_4 排放通量研究[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(4) :383-386.
- HUANG Guo-hong, CHEN Guan-xiong, WU Jie, et al. N_2O and CH_4 fluxes from typical fields in northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4) :383-386.
- [7] 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 emission of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6) :1186-1191.
- [8] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用 DNDC 模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤 N_2O 释放的潜在影响 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6) :917-922.
- XU Wen-bin, LIU Wei-ping, LIU Guang-shen. Potential effect of fertilizing and tilling on N_2O emission from upland soils analyzed by DNDC model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6) :917-922.
- [9] Syvasalo E, Regina K, Turtola E, et al. Fluxes of nitrous oxide and methane, and nitrogen leaching from organically and conventionally cultivated sandy soil in western Finland[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 113 :342-348.
- [10] Clemens S, Reiner W, Kirsten K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton in the Aral Sea Basin, Uzbekistan Influence of nitrogen application and irrigation practices[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40 :290-301.
- [11] Flessa H, Ruser R, Dorsch P, et al. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions from two farming systems in southern Germany[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91 :175-189.
- [12] 陈长寿. 农田施肥原理与实践[M]. 北京 :农业出版社, 1984.
- CHEN Lun-shou. Fertilizer Application theory and practices in fields[M]. Beijing :Agriculture Press, 1984.
- [13] Beheydt D, Boeckx P, Sleutel S, et al. Validation of DNDC for 22 long-term N_2O field emission measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41 :6169-6211.
- [14] 王效科, 欧阳志云, 苗 鸿. DNDC 模型在长江三角洲农田生态系统的 CH_4 和 N_2O 排放量估算中的应用[J]. *环境科学*, 2001, 22(3) :15-19.
- WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong. Application of DNDC model in estimation of CH_4 and N_2O emission in agricultural ecosystems in Yangtze river delta[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(3) :15-19.
- [15] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生和排放的影响[J]. *应用生态学报*, 1996, 7(3) :273-279.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impacts of soil moisture on N_2O production and emission in rice wheat rotation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3) :273-279.
- [16] 董玉红, 欧阳竹, 李云生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5) :913-918.
- DONG Yu-hong, OUYANG Zhu, LI Yun-sheng, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO_2 and N_2O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5) :913-918.