

施肥与灌溉对春玉米土壤 N₂O 排放通量的影响

刘运通¹, 万运帆¹, 林而达¹, 李玉娥¹, 陈德立², 秦晓波¹, 高清竹¹, 金琳¹, 武艳娟¹

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;2.澳大利亚墨尔本大学土地与食品学院, Parkville 3010)

摘要: 2007年在山西省榆次县利用静态箱自动监测系统对传统和优化两种施肥方式下春玉米土壤追肥和灌溉前后 N₂O 排放通量进行了连续测定, 该地区土壤质地为壤土, 气候为温带大陆性半干旱气候。结果表明, 灌溉和施肥对 N₂O 的排放影响较大, 当土壤含水量较低时, 施肥并不会导致 N₂O 通量迅速升高。在不灌溉的条件下施肥前后 N₂O 的日排放通量特征为单峰型, 凌晨 4:00 左右为最低值, 下午 16:00 左右达到最高值, 与空气和 5 cm 土壤温度相关性均达到了极显著水平。施肥并灌溉后 N₂O 排放通量迅速升高, 一天之内能够迅速升高约 50 倍。灌溉后 N₂O 日排放通量呈“N”字型走势, 在达到最大值后变为单峰型, 一周后日排放出现了直线下降和水平波动两种不同的走势。经检验施肥并灌溉后一周内优化施肥方式下 N₂O 排放通量极显著低于传统施肥方式($P<0.01$), 优化施肥可以作为减排农田 N₂O 排放的措施之一。

关键词: 春玉米土壤; 施肥; 灌溉; N₂O; 日变化; 通量; 连续观测; 静态自动箱

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-0997-06

N₂O Flux Variations from Spring Maize Soil Under Fertilization and Irrigation

LIU Yun-tong¹, WAN Yun-fan¹, LIN Er-da¹, LI Yu-e¹, CHEN De-li², QIN Xiao-bo¹, GAO Qing-zhu¹, JIN Lin¹, WU Yan-juan¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. School of Resource Management, Faculty of Land and Food Resources, the University of Melbourne, Parkville 3010, Australia)

Abstract: N₂O flux variations from spring maize soil under traditional and optimized fertilization were monitored continuously using automatic static chamber system in Yuci County, Shanxi Province in 2007. The results showed that: Nitrous oxide flux was mainly affected by irrigation and fertilization. However, fertilization wouldn't result in high N₂O flux immediately if the soil water content is lower. Before and after fertilization without irrigation, the pattern of diurnal N₂O flux was in a single peak type. Lowest N₂O flux appeared at about 4am and highest N₂O flux occurred at about 4pm. N₂O flux had a very significant relative with air temperature and soil temperature at 5 cm. After fertilization and irrigation the N₂O flux increased 50 times in one day. Diurnal N₂O flux dynamic showed an “N” shape, then the diurnal N₂O flux dynamic was in a single peak shape after the N₂O flux reached the maximum value. Diurnal N₂O flux dynamic shown two different types one week later: sharply linear fall and horizontal fluctuation. N₂O flux with optimized fertilization was very significant lower than that with traditional fertilization ($P<0.01$). Therefore, the optimized fertilization can be an option for reducing N₂O emission from cropland.

Keywords: spring maize soil; fertilization; irrigation; N₂O; diurnal variation; flux; continuous measurement; automatic static chamber system

气候变化是国际社会公认的最主要的全球性环境问题之一^[1]。农业是一个重要的温室气体来源, 全球一半以上的氧化亚氮(N₂O)来自土壤的硝化和反硝化过程^[2]。确定农业温室气体的排放量并探寻减排方法

已成为各国的当务之急。中国是一个农业大国, 耕地面积为 1.3 亿 hm², 占世界耕地面积的 9.3%, 氮肥用量为 2 229.3 万 t (折纯量), 占世界氮肥消耗总量的 25.6%^[3]。李长生等利用 DNDC 模型模拟中国农田土壤 N₂O 排放总量, 结果表明, 中国农田是 N₂O 的主要排放源^[4]。农田翻耕、施肥、灌溉等管理措施不仅长期改变着农田生态系统中的化学元素循环, 而且给全球气候变化带来影响。氮肥施用对农业土壤 N₂O 的排放具有明显的促进作用^[5,6]。随着氮肥施入量的增加, N₂O 排放量呈线性增加^[7], 因此选择合理的施肥措施

收稿日期: 2007-09-12

基金项目: 科技部“十一五”支撑计划课题“农田污染物源头控制关键技术研究(2006BAD17B01); ACIAR 中澳合作项目(LWR2003/039)

作者简介: 刘运通(1980—), 河北沧州人, 研究方向为气候变化。

E-mail: liuyt@ami.ac.cn

通讯作者: 万运帆 E-mail: wanyunfan@ami.ac.cn

来减少 N₂O 的排放是非常必要的。而农业土壤中的 N₂O 浓度低,田间变异非常大^[2],利用田间连续自动观测系统通过密集观测,能最大限度地减少排放峰的漏测和降低田间 N₂O 观测的变异性^[8-9]。本研究利用全自动田间连续观测系统,对春玉米农田不同施肥措施下 N₂O 的排放特征进行了研究,对探索减少农田 N₂O 排放的管理措施具有一定的参考价值。

1 材料方法

1.1 试验点基本情况

试验点位于山西省晋中市榆次区张庆乡演武村,东经 112°51′,北纬 37°38′,海拔高程为 789 m,属洪积和冲积平原地貌,温带大陆性半干旱气候,全年平均气温 9.3℃。多年平均降水量 430 mm,多年平均蒸发量为 2 068.5 mm。试验点土壤理化性质如表 1 所示,速效氮、磷、钾的提取方法分别为:碱解扩散法、碳酸氢钠法和乙酸铵提取法^[10]。

表 1 试验田基本理化性状

Table 1 Physical and Chemical properties of field soil

pH	容重/ g·cm ⁻³	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	速效氮/ mg·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹
7.5	1.33	16.3	1.79	90.2	1.58	18.1	90.6

1.2 试验设计

本试验作物为春玉米,设传统施肥和优化施肥两种处理,其中传统施肥处理底肥为 550 kg·hm⁻² 硝酸磷(N≥26.5%,P₂O₅≥11.5%),追肥为 400 kg·hm⁻² 尿素(总氮≥46.4%);优化施肥底肥为 850 kg·hm⁻² 过磷酸钙(P₂O₅≥11.5),200 kg·hm⁻² 硫酸钾(K₂O≥52%,S≥18%),追肥 250 kg·hm⁻² 尿素(总氮≥46.4%);追肥方式为沟施覆盖,在玉米抽雄期进行。每处理设 3 个重复,

随机区组排列。小区面积为 10 m×20 m²,小区间隔离带为 1 m,小区在各方向上无差别。两次灌溉,分别在春玉米播种前及抽雄期,每次灌溉量为 700 m³·hm⁻²。

1.3 N₂O 通量测定方法

N₂O 通量的测定采用自动静态箱法,每个小区都放置一个自动开启的静态观测箱。箱体以角钢作为支架,四面及顶盖由透明有机玻璃制成,箱体内有混合气体用的小电风扇、采气管及温度传感器,温度传感器用于测定箱内空气和土壤温度,其中空气温度用于通量的计算。箱体长宽均为 70 cm,高 140 cm,无底座,底部有四脚直接插入土中并以土密封^[11]。每个静态箱通过采气管道和采气泵与气相色谱进样口相连,静态箱的罩箱时间为 28.5 min,气体经过滤干燥后送入气相色谱中进行自动分析,每隔 2 h 自动测定一次静态箱的排放通量。土壤水分的测定采用手持式 TDR 水分测定仪测定。

N₂O 浓度测定采用 HP5890II 气相色谱仪,检测器为 ECD,其工作温度为 330℃,柱型为 P.Q 填充柱,载气为氮气,流量为 25 mL·min⁻¹。根据盖箱前后温室气体浓度的不同计算排放通量^[12]。

2 结果分析

本研究主要利用田间自动观测系统对 2007 年 7 月 5 日玉米追肥前后和 7 月 13 日灌溉后 N₂O 的日变化特征进行研究。

2.1 玉米施肥前日变化特征

图 1 是 7 月 5 号追肥前 3 d 的 N₂O 通量及温度变化情况图。从图 1 中可以看出,这 3 d 的 N₂O 通量相差不大,变化趋势较一致。N₂O 通量在 1 d 中有一定的波动,但变化幅度也不大,每天均为单峰型,排放高值均在 16 h 左右,排放低值在 2~6 h。N₂O 通量与温

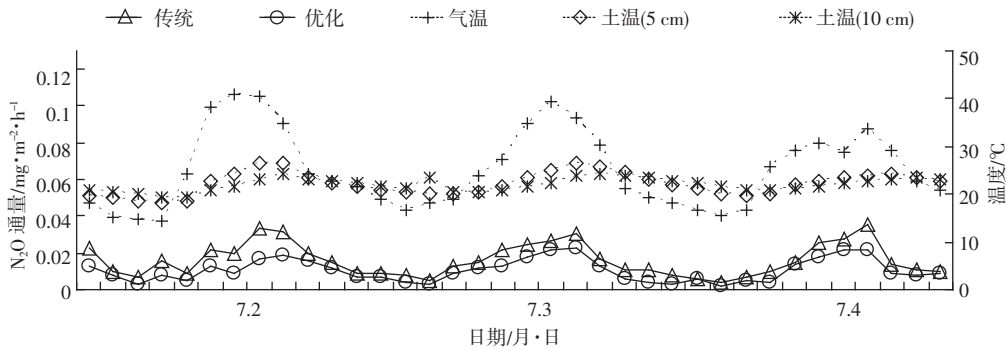


图 1 追肥前 3 d N₂O 日变化特征(7 月 2—4 日)

Figure 1 Character of diurnal N₂O flux variation 3 days before topdressing (2nd-4th, July)

度的相关关系如表 2 所示,经分析表明 N₂O 通量与空气温度和 5 cm 土壤温度均达到了 0.01 的极显著正相关关系。

表 2 N₂O 通量与温度的相关性

Table 2 The correlation index of temperature and N ₂ O flux						
日期	自由度	传统			优化	
		气温	土温 (5 cm)	土温 (10 cm)	气温	土温 (5 cm) 土温 (10 cm)
7.2~7.4	34	0.795**	0.651**	0.255	0.745**	0.636** 0.279
7.5~7.12	100	0.541**	0.766**	0.687**	0.561**	0.742** 0.651**
7.13~7.19	84	0.221*	0.001	-0.137	0.176	-0.013 -0.129
7.13	10	0.158	-0.042	0.116	0.288	-0.012 0.149
7.18	10	0.240	0.696*	0.646*	0.058	0.309 0.244
7.19	10	0.085	0.022	0.063	0.201	0.180 0.126

注:* 代表 5%显著相关;** 代表 1%极显著相关。

2.2 玉米追肥后日变化特征

试验地玉米追肥于 7 月 5 日 9:00—12:00 进行,图 2 显示出了施肥后一周内 N₂O 通量及空气温度和土壤温度的变化情况。施肥 4 h 后出现了一个小的排放峰,其排放量在传统与优化施肥方式下分别为

0.054 6 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 0.030 6 mg·m⁻²·h⁻¹,较 7 月 2 日至 4 日中传统和优化施肥方式下 N₂O 排放通量最大值 0.035 3 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 0.022 7 mg·m⁻²·h⁻¹ 略有升高。7 月 5 日施肥后到一周内 N₂O 通量并没有突然升高而是逐渐升高,并在 7 月 9 日达到最高值,传统与优化施肥方式下 N₂O 排放通量分别为 1.197 mg·m⁻²·d⁻¹ 和 0.92 mg·m⁻²·d⁻¹,并从 7 月 10 日开始缓慢下降。从表 2 中 N₂O 通量与温度的相关关系来看,N₂O 通量与气温和土温相关关系均达到了 0.01 的极显著水平。

N₂O 通量没能在施肥后迅速提高,主要可能是受到了土壤水分的影响。通过对 N₂O 通量与土壤表层水分含量的分析发现传统与优化施肥两种方式下两者之间的负相关关系均达到了 0.05 的显著水平 ($r_{\text{传统}} = -0.732^*$, $r_{\text{优化}} = -0.741^*$, $n=6$),土壤含水量(体积含水量)从 5 日的 18.65%下降到 12 日的 14.31%,土壤含水量总体都较低,一方面使得施入土壤的尿素没能迅速溶解,土壤中 NH₄⁺浓度升高缓慢;另一方面,多数研究者研究得出土壤水分含量较低时硝化作用与土壤含水量呈正相关^[13,14]。低水分含量也影响了占主导作用

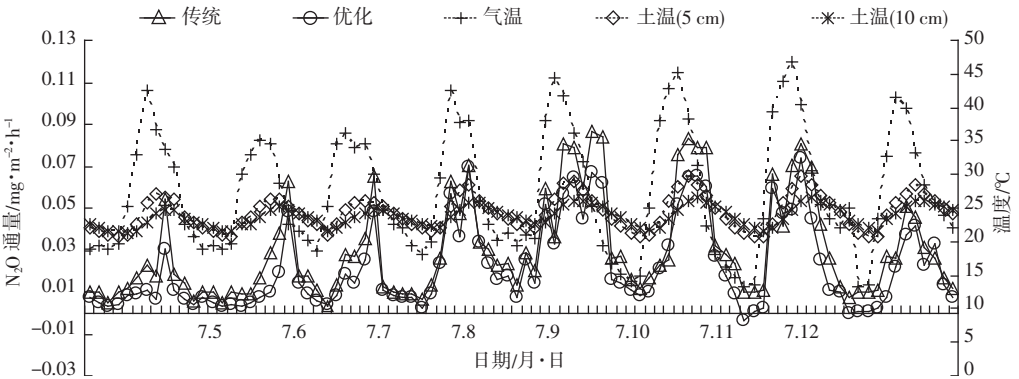


图 2 施肥后一周内 N₂O 通量日变化特征(7 月 5—12 日)

Figure 2 Character of diurnal N₂O flux variation one week after topdressing (5th—12th, July)

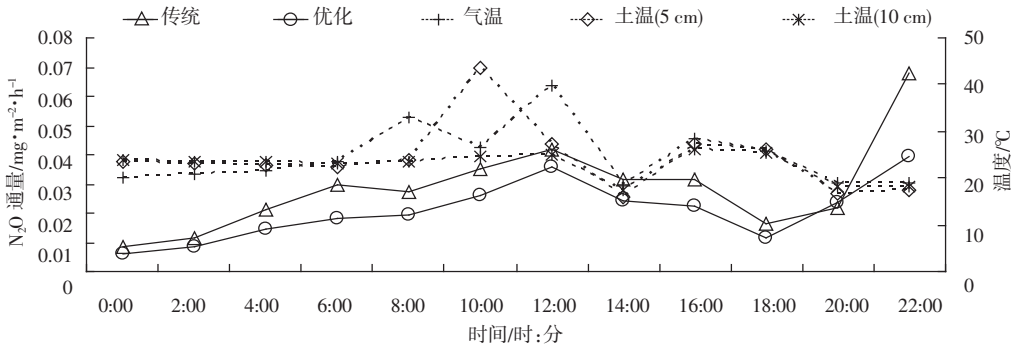


图 3 N₂O 通量日变化特征(7 月 13 日)

Figure 3 Character of diurnal N₂O flux variation (13th, July)

的硝化反应的速度,从而导致 N₂O 通量升高缓慢。

2.3 玉米施肥灌溉后日变化特征

玉米第二次灌溉于7月13日18:00完成,灌溉量为700 m³·hm⁻²,当日 N₂O 通量如图3所示。从图3中可以看到,在下午18:00以前 N₂O 的变化趋势比较平缓,与7月2日至4日的变化趋势相似。但是灌溉2 h后开始出现突然升高,4 h后升高的幅度开始加大。图4是施肥并灌溉后一周内 N₂O 通量变化图,从图4中可以看出 N₂O 通量于14日16:00时(灌溉后22 h)升高到最高值,传统与优化方式下 N₂O 排放通量分别为1.44 mg·m⁻²·h⁻¹和1.29 mg·m⁻²·h⁻¹,该值分别约为施肥后灌溉前最高值的41倍和57倍。N₂O 通量在13日下午灌溉后显示出了极为强劲的上升势头,之后缓慢下降。分析发现13—19日 N₂O 通量与温度相关性并不高(表2),只有传统施肥方式下 N₂O 排放通量与空气温度达到了0.05水平的显著性正相关,其余均不显著;而灌溉后传统与优化施肥方式下 N₂O 通量与土壤含水量(体积含水量)相关性均达到了0.05水平的正相关($r_{\text{传统}}=0.741^*$, $r_{\text{优化}}=0.775^*$, $n=6$)。因而 N₂O 通量的迅速升高主要受到了土壤水分的影响。经统计,施肥灌溉后一周内传统与优化施肥方式下的

N₂O 的排放量分别占玉米整个生育期的49.9%和51.4%,因此施肥、灌溉是影响 N₂O 排放的主要因素。

从图4中可以看出14日 N₂O 通量达到最高值后每日以单峰型缓慢下降,一直持续至17日。图5为7月18—19日 N₂O 通量日变化特征图。18日 N₂O 通量从中午12:00开始直线下降,至19日 N₂O 排放通量基本上不变,波动幅度很小,直到20:00开始缓慢下降。20日及以后 N₂O 排放通量的峰型较为稳定,与7月2—4日的趋势一致,在此不再列出。

2.4 传统施肥和优化施肥方式下 N₂O 排放量的差异

对于上述的追肥前、追肥后和灌溉后3个时期的 N₂O 日平均排放量进行了计算并对传统与优化施肥方式进行了差异性分析(表3)。追肥后传统与优化两种施肥方式下 N₂O 日平均排放量均比追肥前高,追肥前、追肥后和灌溉后传统施肥方式下 N₂O 日均排放量分别是优化施肥方式下 N₂O 日均排放量的1.25、1.51和1.64倍。经检验施肥前与施肥后传统与优化两种施肥方式的差异性均达到了显著水平,灌溉后传统与优化两种施肥方式的差异性达到了极显著水平,说明施肥后的灌溉是影响传统与优化两种施肥方式下 N₂O 排放的主要原因。

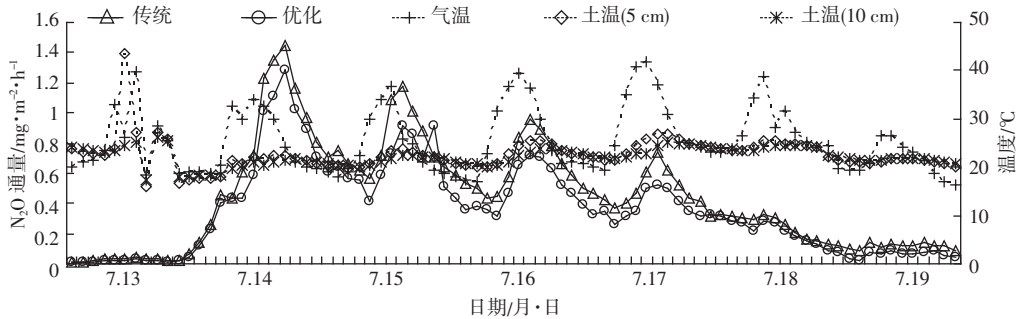


图4 施肥灌溉后一周 N₂O 通量日变化特征(7月13—19日)

Figure 4 Character of diurnal N₂O flux variation one week after topdressing and irrigation (13th~19th, July)

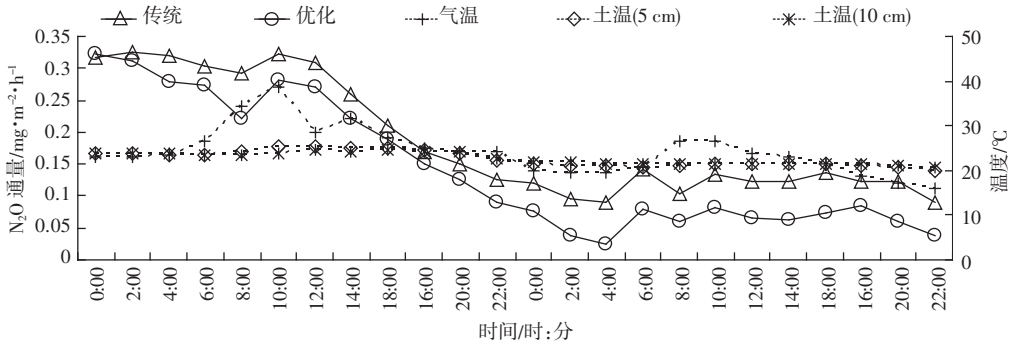


图5 N₂O 通量日变化特征(7月18—19日)

Figure 5 Character of N₂O flux diurnal variation (18th~19th, July)

表 3 不同时期 N₂O 日均排放量(mg·m⁻²·d⁻¹)

Table 3 The average diurnal N₂O flux at different stages(mg·m⁻²·d⁻¹)

日期	传统	优化	传统/优化/%
施肥前(7.2—7.5)	0.397a	0.242b	125
施肥后(7.6—7.13)	0.758a	0.502b	151
灌溉后(7.14—7.20)	11.455A	9.198B	164

注:a,b 代表 0.05 水平差异显著;A,B 代表 0.01 水平差异显著。

3 小结与讨论

在不灌溉的条件下施肥前后 N₂O 的日排放通量特征为单峰型,上午 4:00 左右为最低值,下午 16:00 左右达到最高值,N₂O 排放通量与温度相关性达到极显著水平。施肥并灌溉后一周内 N₂O 排放通量与土壤含水量显著正相关,而与温度相关性不明显,只在传统施肥方式下 N₂O 排放通量与空气温度相关性达到了 0.05 水平的显著。通过分析施肥并灌溉后 N₂O 排放通量与土壤含水量的关系,结果显示灌溉后 N₂O 排放通量与土壤含水量达到了 0.05 水平的显著相关($r_{\text{传统}}=0.741^*$, $r_{\text{优化}}=0.775^*$, $n=6$),因此温度对 N₂O 通量的影响不如灌溉前明显,主要是灌溉和施肥的共同作用掩盖了温度对 N₂O 通量的影响。

施肥对 N₂O 的排放影响较大,但是需要有一定的水分。如果施肥时土壤中含水量较低,N₂O 排放不会迅速增加;如果施肥后灌溉或降水,则 N₂O 的排放速率 1 d 之内能够迅速升高几十倍。灌溉后出现了极强的 N₂O 排放峰,导致 N₂O 日排放峰型在灌溉后出现了“N”字型的走势,在达到最大值后依然是单峰型。但是当 N₂O 排放通量灌溉一周后开始下降时,日排放出现了直线下降和水平直线两种不寻常的走势。主要原因可能是大量的水分溶解了施入的尿素,使得土壤中的 NO₃⁻、NH₄⁺等硝化和反硝化过程反应底物的浓度迅速升高,促进了反硝化和硝化作用的进行。另外土壤含水量灌溉后一直在下降,在这由湿变干的过程会有利于 N₂O 的产生与排放^[15,16]。通过对优化施肥与传统施肥条件下 N₂O 排放量的比较,优化施肥方式下 N₂O 的排放量极显著低于传统施肥方式下 N₂O 的排放,优化施肥在减少农田 N₂O 排放的同时,减少了农民对氮肥的投入。

本试验在传统与优化两种施肥方式下只对 N₂O 通量进行了研究,目前研究结果表明优化施肥方式下 N₂O 的排放量极显著低于传统施肥方式下 N₂O 的排放,为减少 N₂O 排放提供了一种选择;而两种施肥方

式对氨挥发、土壤中铵态氮、硝态氮和地下水水质等环境因素的影响还有待于以后进一步的研究。

参考文献:

[1] 林而达,李玉娥,郭李萍,等.中国农业土壤固碳潜力与气候变化[M].北京:科学出版社,2005.

LIN E D, LI Y E, GUO L P, et al. Potential of chinese agriculture soil carbon sequestration and climate change [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[2] IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Work Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001.

[3] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2006.

Countryside Social Economy Investigation Department of State Statistical Bureau. Rural statistical yearbook of China [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006.

[4] 李长生,肖向明,Frolking,等.中国农田的温室气体排放[J].第四纪研究,2003,23(5):493-504.

LI C S, XIAO X M, Frolking, et al. Greenhouse gas emissions from cropland of China[J]. *Quaternary Period Research*, 2003, 23(5): 493-504.

[5] Dobbie K E, Mc Taggart I P, et al. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D21): 26891-26899.

[6] 侯爱新,陈冠雄,O Vancleemput.不同种类氮肥对土壤释放 N₂O 的影响[J].应用生态学报,1998,(2):176-180.

HOU A X, CHEN G X, O. Vancleemput. Effect of different nitrogen fertilizers on N₂O emission from soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, (2): 176-180.

[7] Gregorich E G, Rochette P, VandenBygaart A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 83(1): 53-72.

[8] 高志岭,陈新平,张福锁,等.农田土壤 N₂O 排放的连续自动测定方法[J].植物营养与肥料学报,2005,64(1):64-70.

GAO Z L, CHEN X P, ZHANG F S, et al. Continuous-automatic method for measuring N₂O emission from agricultural soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 64(1):64-70.

[9] 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 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(10):84-90.

WANG Y S, LIU G R, WANG Y H, et al. Simultaneous measurement of CO₂, CH₄ and N₂O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(10): 84-90.

[10] 中国土壤学会.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.

Soil Science Society of China. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Scientific Press, 2000.

[11] 万运帆,李玉娥,林而达,等.静态箱法测定旱地农田温室气体时密

闭时间的研究[J].中国农业气象,2006,27(2):122-124.

WAN Y F, LI Y E, LIN E D, et al. Studies on closing time in measuring greenhouse gas emission from dry cropland by static chamber method[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(2): 122-124.

[12] 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 in upland farm of Beijing[J]. *Agricultural Meteorology*, 2005, 26(1): 7-10.

[13] 郑循华,王明星,王跃思.华东稻麦轮作生态系统的 N₂O 排放研究[J].应用生态学报,1997, 8 (5):495-496.

ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S. N₂O emission from rice wheat ecosystem in Southeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(5): 495-496.

[14] Mosier A R, Guenzi W D, Schweizer E E. Soil losses of dinitrogen and nitrous oxide from irrigated crops in northeastern Colorado[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50:344-348.

[15] 封克,殷士学.影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J].土壤学进展,1995,23(6):35-42.

FENG K, YIN S X. Influence of soil properties on N₂O productions and emissions from farmland[J]. *Progress In Soil Science*, 1995, 23(6): 35-42.

[16] 王智平,曾江海,张玉铭.农田土壤 N₂O 排放的影响因素[J].农业环境保护,1994,13(1):40-42.

WANG Z P, ZENG J H, ZHANG Y M. Influence factors on N₂O emission in farmland soil [J]. *Agro-environmental Protection*, 1994, 13(1): 40-42.