

不同施氮水平对稻麦轮作农田氧化亚氮排放的影响

王海云, 邢光熹

(中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 利用江苏常熟田间随机区组试验, 以密闭箱法采集气样, 气相色谱分析 N_2O 浓度, 对稻麦轮作制下不同施氮水平的土壤 N_2O 排放进行了观测, 探讨了不同施氮水平对稻麦轮作农田氧化亚氮排放的影响。结果表明, 土壤 N_2O 排放量受施氮量的影响, 稻季和麦季 N_2O 排放量都随施氮量的增加而增加; 稻季 N_2O 排放量最大峰值出现在烤田复水期间, 其排放大小主要受基肥和分蘖肥施用量的影响, 并随施氮量的增加而增大; 麦季最大峰值出现在气温回暖的第二次追肥后, 排放量的最大峰值也随施氮量的增加而增大; 稻麦轮作土壤 N_2O 排放以麦季的排放为主, 麦季 N_2O 累积排放量在轮作周期中占三分之二。

关键词: N_2O 排放; 小麦; 水稻; 施氮量

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)12-2631-06

Effect of Nitrogen Fertilizer Rates on Nitrous Oxide Emission from Paddy Field Under Rice-Wheat Rotation

WANG Hai-yun, XING Guang-xi

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Research efforts have increasingly focused on finding the environmental and artificial influence factors of nitrous oxide (N_2O) emission from paddy fields, especially from the rice-wheat rotation system. This paper studied the season characters and the effect of nitrogen fertilizer rates on N_2O emission during the whole period of rice-wheat rotation from soil in Changshu, Jiangsu Province of China. The treatments of fertilizer N (urea) in field study were 0, 100, 150, 200, 250, 300 and 350 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ for rice growing season and were 0, 100, 150, 200, 250 and 300 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ for wheat growing season respectively. Experimental plots in field study followed randomized block design, and each treatment was triplicate. The emitted gases from the systems were collected with closed chambers method, and the N_2O was detected by gas chromatograph. The N_2O emission increased with the increase mounts of fertilizer N in the whole rotation season. In rice growing season, the N_2O emission peaks occurred during the mid-season aeration rather than other periods, and increased with the increase total mounts of base fertilization and fertilizer N during tillering period. Only enough fertilizer N would meet the both need of the plants and the nitrobacteria. Comparing with rice growing season, the soil in wheat growing season were not flooding but keeping moist. Therefore the N_2O emission in wheat growing season accounted for about 2/3 of that in the whole rotation season, and the N_2O emission peaks occurred when the second topdressing was applied.

Keywords: N_2O emission; rice; wheat; amounts of fertilizer nitrogen

大气中温室气体浓度不断增加导致的气候变暖是当今全球性的环境问题之一。 N_2O 是一种重要的温室气体, 单位分子的增温潜势是 CO_2 的 296 倍, 并且其浓度每年以 0.2%~0.3% 的速度增长^[1]。 N_2O 在大气中具有较长的滞留时间, 并参与大气中许多光化学反应, 表现为在平流层中通过 NO_x 把 O_3 转化为 O_2 , 形

成 NO 和 N_2 , 破坏臭氧层^[2]。农田土壤是 N_2O 的重要释放源, 国内外许多学者进行了多方面的研究^[3-4]。我国的氮肥使用量世界第一, 已有不少学者对氮素施入对土壤 N_2O 排放作了深入的研究, 发现 N_2O 排放量随氮肥施用量的增加而增加^[3,5-6]。然而, 对我国南方常见的稻麦轮作生态系统 N_2O 排放的研究中, 有关化学氮肥施用的影响研究主要侧重于肥料类型, 对施氮水平的影响虽然已有一些研究, 但施氮水平的分级一般在 3~4 个水平, 且对其他耕作管理涉及不深。本研究设置了 6~7 个施氮水平, 探讨氮素施用量水分管理两者对稻麦轮作田 N_2O 排放的影响, 深入研究稻麦轮作

收稿日期: 2009-04-15

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (30390081)

作者简介: 王海云 (1980—), 女, 吉林农安人, 硕士, 目前从事农田温室气体排放与氮循环方面的研究。E-mail: wanghaiyun80@163.com

通讯作者: 邢光熹 E-mail: xinggx@issas.ac.cn

生长季节内 N_2O 的排放规律和主要影响因素,为针对性指导稻麦轮作体系合理施氮及评定氮肥对环境的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2006—2007 年在中国科学院常熟生态试验站(31°32'N, 120°42'E)试验田中进行。供试土壤为偏碱性乌珊土,其基本性状见表 1。田间试验设计为稻麦轮作。不同施氮量水稻和小麦的基追比为 4:3:3,即基肥占 40%,第一次追肥占 30%,第二次追肥占 30%。2006 年 6 月 26 日施稻季基肥,次日进行稻苗移栽;7 月 11 日追施分蘖肥,8 月 1 日烤田,7 日复水,9 日追施穗肥,10 月 25 日收获水稻;11 月 13 日施麦季基肥,次日小麦播种,1 月 4 日第 1 次追肥,3 月 20 日第 2 次追肥,5 月 17 日收获小麦。稻季田间设置 7 个施氮处理,分别为 CK(不施氮肥)、100、150、200、250、300 和 350 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$;麦季田间设置 6 个施氮处理,分别为 CK(不施氮肥)、100、150、200、250 和 300 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氮肥施用尿素,磷肥施用过磷酸钙,钾肥施用氯化钾。磷肥施用量为 60 $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$,钾肥施用量为 120 $\text{kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。磷钾肥作基肥一次施用。各处理设 3 次重复,小区面积 15 m^2 ,随机区组排列。

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 Some basic chemical properties of the experimented soils

pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效氮/ $\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$
7.1	35.0	2.09	12.4	17.7

1.2 气体采集与测定分析

N_2O 气体样品采用密闭箱法采集,密闭箱为透明有机玻璃箱。每次采样时间为上午 8:00–10:00,每隔 15 min 采样 1 次,在 0、15、30 和 45 min 时采集共 4 次, N_2O 样品用带十通阀控制的反吹装置和 ^{63}Ni 电子捕获器的气相色谱(HP5890 II)测定,测定条件为:进样口温度 100 $^{\circ}\text{C}$,炉温 85 $^{\circ}\text{C}$,检测器温度 320 $^{\circ}\text{C}$ 。前置柱为 1 $\text{m}\times 0.3\text{ cm (o.d.)}$ 的不锈钢 Porapak Q 柱,分析柱为 3 $\text{m}\times 0.3\text{ cm}$ 的不锈钢 Porapak Q 柱。载气为 95% 氩气+5% 甲烷,流速为 30 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

N_2O 排放通量根据徐华等提供的公式进行计算^[7]。 N_2O 累积排放量以每次采样时 N_2O 排放通量平均值与相邻两次采样间隔时间相乘后再相加而得,季节累积排放量是从当季作物整地播种开始至收获时为止的累积排放量。平均排放通量是将各个重复的每次观测值按间隔时间加权平均后再平均。处理间以 3 个重复的平均值进行方差分析和多重比较。试验数据利用软件 SPSS 13.0 进行统计分析(Duncan, $P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水稻生育期内土壤 N_2O 的排放

图 1 是水稻从移栽至收获期间稻季 N_2O 排放通量的时间变化。整个生育期内各施氮水平下 N_2O 排放规律基本上是一致的,都是在烤田复水期出现最大排放峰,保持田面水层期间排放通量都较小,不同施肥处理对 N_2O 排放时间变化的影响主要表现在明显增大排放强度。

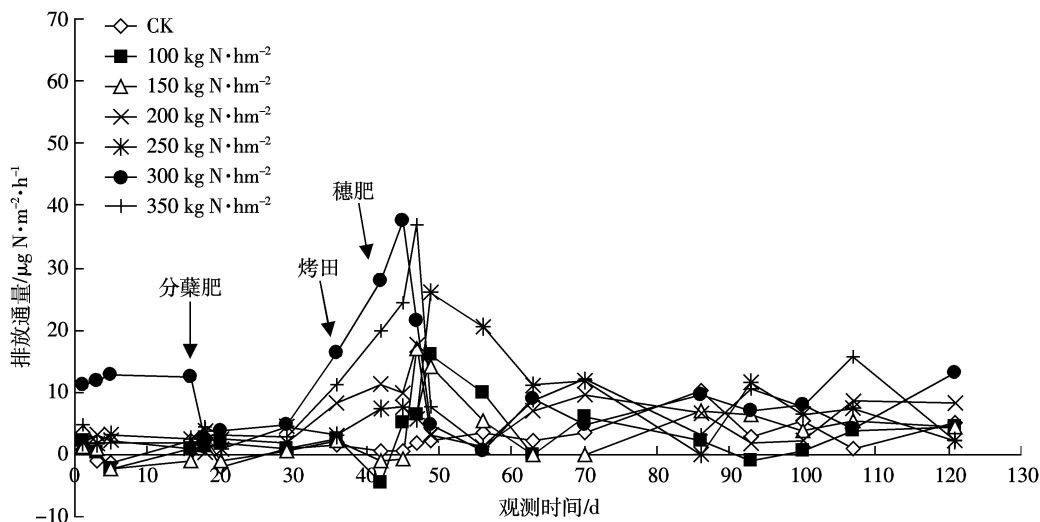


图 1 不同施氮水平稻季土壤的 N_2O 排放通量

Figure 1 The N_2O flux from soil during rice growing season under the various application amounts of nitrogen

各处理稻季土壤从水稻移栽后到烤田之前(1~29 d)几乎没有 N_2O 排放,仅在第 1 次追肥后有微弱排放,甚至少数处理在短时间内 N_2O 排放出现负值,持续时间也较短。一般认为,稻田在淹水状态下只能排放少量 N_2O ,即使施氮肥,排放仍较微弱^[8]。烤田(36 d)后 N_2O 排放随各施肥量的不同而有所差异,但都显著高于不施氮处理。不施氮肥处理在烤田后只出现少量的排放,虽然比烤田前的排放通量大,持续时间也较长,但总体排放通量并不大。施氮量 100 和 150 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理在烤田复水期间(36~42 d)并没有出现排放通量的增加,反而和不施肥的处理一样,出现减少,甚至一度出现负值;施穗肥(45 d)后才出现 N_2O 排放高峰。施氮量 200 和 250 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理在烤田开始(36 d)后 N_2O 的排放出现上升,复水(42 d)后马上有所下降,但在施穗肥(45 d)后强势反弹,出现了 N_2O 的排放高峰。施氮量 300 和 350 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理在烤田复水期间 N_2O 的排放上升,与施穗肥(45 d)后所形成的排放峰合为一体而成为一个较大排放期。各处理在烤田-复水-施穗肥时期内(36~63 d)排放峰的大小因施肥量不同而不同,最大值按施肥量大小依次为 36.80、37.53、26.02、17.66、16.96 和 15.91 $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (方差分析结果显示,峰值多重比较结果和前后文中排放累积量的基本一致)。烤田-复水-施穗肥时期内(36~63 d)的排放量在各施肥处理都占整个稻季累积排放量的 25%以上,而不施肥只占 12.3%。63 d 后各处理都产生比烤田之前峰值高、持续时间长的若干排放脉冲。

共观测 121 d 的稻季土壤 N_2O 平均排放通量和季节累积排放量的数据也证实了施肥量与排放量的关系(表 2)。通过方差分析多重比较,不施氮肥处理平均排放通量(2.93 $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$),显著小于施氮肥处理;施氮量 100 和 150 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的平均排放通量差异不显著,是不施氮肥处理平均排放通量的 1.44 倍,显著低于其他施氮肥处理;施氮量 250 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的平均排放通量为 6.02 $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,与 200 和 300 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量的处理差异都不显著,但 200 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量的处理平均排放通量显著低于 300 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量的处理;350 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量的处理平均排放通量最高,达 9.03 $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,是不施氮处理的 3.08 倍,显著高于其他处理。季节累积排放量规律与平均排放通量是一致的,其中施氮量 150 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理季节累积排放量占施氮量百分比最小,仅为 0.025%,与施氮量 100 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理季节累积排

放量占施氮量百分比差异不显著,显著小于其他施氮处理;季节累积排放量占施氮量百分比最大的是施氮量 350 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的处理,为 0.051%,但它仅与施氮量 100 和 150 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有差异,与其他处理没有差异。所以,施氮处理排放显著高于不施氮处理,前人的研究也证实了这一结果^[9]。数据分析还证明,施氮肥量越多, N_2O 排放量就越大。

表 2 不同施氮水平稻季土壤 N_2O 排放的差异

Table 2 The N_2O flux characters during rice growing season under the various application amounts of nitrogen

施氮量/ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	观测时间/ d	N_2O 平均排放通 量/ $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	N_2O 季节累积排 放量/ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	占施氮量 百分比/%
CK	121	2.93±0.17 a	0.085±0.00 a	
100	121	4.24±0.46 b	0.123±0.01 b	0.038±0.01a
150	121	4.23±0.59 b	0.123±0.02 b	0.025±0.01 a
200	121	6.09±0.11 c	0.177±0.00 c	0.046±0.00 b
250	121	6.62±0.42 cd	0.199±0.02 cd	0.046±0.01 b
300	121	7.16±0.19 d	0.208±0.01 d	0.041±0.00 b
350	121	9.11±0.76 e	0.265±0.02 e	0.051±0.01 b

注:同列字母相同的处理间差异在 5%水平上不显著,下同。

2.2 小麦生育期内土壤 N_2O 排放

如图 2 所示,麦季内各处理 N_2O 排放存在明显的时间变化,并呈现出相同的时间变化模式。各处理全生育期基本上都出现 4 个排放峰,其中第 3 个最大;不施氮处理在整个生长季节整体排放较低,排放峰不明显。

第 1 个排放峰出现在小麦苗期,基肥的施入提供了氮源,但随后一个月内基本没有 N_2O 的排放,可能是因为气温的逐渐降低影响了硝化与反硝化的微生物过程;第 2 个排放峰出现在返青期初期,气温上升与适宜土壤湿度都有利于 N_2O 的排放,但随后小麦生长对氮素需求的增加致使排放通量又降低;第 3 个排放峰出现在第 2 次追肥,土壤补充了大量的氮素后,其峰值也最高,出现在第 133~134 d,其按施肥量从少到多依次分别是 48.15、54.98、65.14、87.52 和 121.85 $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;第 4 个排放峰出现在灌浆期,排放通量较小。各排放峰基本都是随施肥量增加而增大。

麦季 N_2O 排放共观测 186 d,数据见表 3。 N_2O 平均排放通量基本上随施氮量的增加而增加,季节累积排放量有相同的规律。方差分析结果表明,不施氮处理平均排放通量(3.06 $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)显著小于施氮肥处理;施氮量 100 和 150 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的平均排放通量相互差异不显著,且显著低于其他施氮肥处理,分别

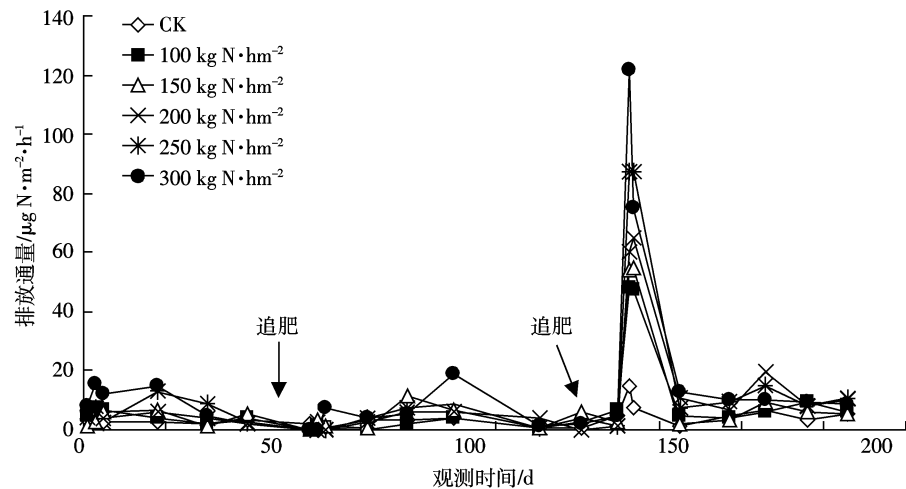


图 2 不同施氮水平麦季土壤不同时间的 N₂O 排放通量

Figure 2 The N₂O flux from soil during wheat growing season under the various application amounts of nitrogen

是不施氮处理平均排放通量的 1.92 和 1.99 倍;施氮量 200、250 和 300 kg N·hm⁻² 的平均排放通量都分别与其他处理差异显著,其中施氮量 300 kg N·hm⁻² 平均排放通量最高,为 12.69 μg N·m⁻²·h⁻¹。季节累积排放量规律与平均排放通量是一致的,其中施氮量 150 kg N·hm⁻² 处理季节累积排放量占施氮量百分比最小,仅为 0.090%;季节累积排放量占施氮量百分比最大的是施氮量 300 kg N·hm⁻² 的处理,为 0.143%。可见,施氮肥显著增加了 N₂O 的排放,并随施氮量的增加而增加。

对于季节累积排放量,麦季显著大于稻季,稻麦轮作制下小麦生长季的 N₂O 排放较多,这与前人的研究结果基本是一致的^[10-11]。不施氮处理麦季土壤 N₂O 季节累积排放量约是不施氮处理稻季的 1.5 倍,而施肥处理麦季土壤 N₂O 季节累积排放量都是同量施肥稻季的两倍多,其中,施氮量 200 kg N·hm⁻² 处理最小,为 2.03 倍,而施氮量 300 kg N·hm⁻² 最大,为 2.69 倍。麦季 N₂O 的季节累积排放量占稻麦轮作整个生

长季节 N₂O 累积排放量的三分之二。

3 讨论

土壤生态系统 N₂O 排放主要来自硝化作用和反硝化作用,与水分、氧气、温度、有机质含量、pH、氮素含量等因素都有关^[12-15]。对于适宜作物种植的农田土壤,N₂O 的产生和排放就受到农田的耕作管理的影响,包括氮肥施用和水分管理两个方面。

本研究证实,稻季 N₂O 排放量也随施氮量增加而增加;稻季 N₂O 排放量最大峰值出现在烤田复水期间,其排放量大小主要受基肥和分蘖肥的施用量的影响,并随施氮量的增加而增大。对于水稻生长季,因为稻田落干后再淹水初期,土壤中较高的 NO₃⁻ 含量和淹水还原条件促进了反硝化反应的进行,而且 N₂O 还原酶的生成滞后于 NO₃⁻ 还原酶,滞后期随 NO₃⁻ 含量升高而延长,因此在烤田后复水期间出现 N₂O 排放高峰^[16-17]。本研究还发现,水稻生长季的烤田复水虽然促进了 N₂O 排放但仍然取决于施氮水平。水稻生长季内施基肥和分蘖肥(16 d)量的多少直接影响烤田复水后 N₂O 的排放,不施氮处理在烤田复水后未出现较大的排放。若施低水平的基肥和分蘖肥(图 1),除要满足植物营养需要外,还有大量其他途径的氮素损失,如施基肥后的氨挥发^[18],这就导致此类处理烤田后没有数量较高的 N₂O 排放,甚至出现负值;若中水平的施基肥和分蘖肥,则在烤田复水后会有一定量的 N₂O 排放,直到再有氮素补充则又继续大量排放;若基肥和分蘖肥用量过高,则土壤中的氮素充裕,向大气中排放的 N₂O 会大大增加。当然,施肥量与排放量的关系

表 3 不同施氮水平麦季土壤 N ₂ O 排放的差异				
Table 3 The N ₂ O flux characters during wheat growing season under the various application amounts of nitrogen				
施氮量/ kg N·hm ⁻²	观测 天数/d	N ₂ O 平均排放通 量/μg N·m ⁻² ·h ⁻¹	N ₂ O 季节累积排 放量/kg N·hm ⁻²	占施氮量 百分比/%
CK	186	3.06±0.38a	0.13±0.02a	
100	186	5.88±0.11b	0.26±0.00b	0.126±0.005b
150	186	6.07±0.61b	0.27±0.03b	0.090±0.018a
200	186	7.95±1.07c	0.36±0.05c	0.109±0.024ab
250	186	9.56±0.38d	0.43±0.02d	0.116±0.007ab
300	186	12.69±1.75e	0.56±0.08e	0.143±0.026b

与供试土壤本身的营养状况和水稻不同生育期的氮素利用规律也是有关的。

对于小麦生长季, N_2O 排放除了和水稻一样受施肥的影响, 也受季节变化的影响。季节变化的不同也是导致稻麦两季 N_2O 排放规律不同的一个原因。小麦生长期是从11月到次年5月, 生长期比水稻长两个月, 且历经深秋、冬和春三个季节, 季节变化导致硝化和反硝化反应的活跃程度不同^[9], 因此即使在氮源充足的情况下, 在生长前期 N_2O 排放也较少, 小麦生长中后期, 气温回暖才出现排放高峰(3月25—26日)。

在同一土壤条件下, 稻季和麦季水分管理上的不同是导致麦季 N_2O 排放量显著高于稻季的主要原因。水稻生长季内大部分时间需要保持淹水状态, 中间只有短时间的烤田, 烤田复水过程中土壤中的干湿交替才促进了 N_2O 产生和排放^[20]。麦季的水分管理则是让麦田土壤保持一定的持水量, 降水过多还要排水, 降水过少需要灌溉, 这样麦田土壤基本上在整个小麦生长期保持通气状态, 有利于硝化作用, 遇到降水, NO_3^- 进行反硝化作用, 有利于 N_2O 产生和排放, 因此其排放量显著高于稻季^[21-22]。

4 结论

(1) 土壤 N_2O 排放量受施氮量的影响, 不论稻季或麦季, N_2O 排放量随施氮量的增加而增加。

(2) 稻季 N_2O 峰值出现在烤田复水期间, 其排放大小主要受基肥和分蘖肥的施用量的影响。麦季最大峰值出现在气温回暖的第二次追肥后, 排放量的最大峰值也随施氮量的增加而增大。

(3) 由于水分管理方式不同, 稻麦轮作土壤 N_2O 排放以麦季排放为主, 麦季 N_2O 累积排放量在整个轮作周期中占三分之二。

参考文献:

- [1] IPCC, Climate Change. The scientific basis: Chapter 4. Atmosphere chemistry and greenhouse gases [R]. Cambridge: Cambridge University Press, UK 2001.
- [2] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives decrease nitrous oxide emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J]. *J Environ Qual*, 1999, 28(6): 1105-1111.
- [3] Bouwman A F. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 1996, 46: 53-70.
- [4] Xu H, Xing G, Cai Z, et al. Nitrous oxide emissions from three rice paddy fields in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 23-28.
- [5] Granli T, Bockman O C. Nitrous oxide from agriculture [J]. *Norw Jour of Agri Sci*, 1994, 12: 120-128.
- [6] 徐 华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 N_2O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(2): 186-188.
XU Hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Effect of soil water regime and chemical N fertilizers application on N_2O emission from paddy field[J]. *Applied Ecology*, 1999, 10(2): 186-188.
- [7] 徐 华, 邢光熹, 张汉辉. 太湖地区水田土壤 N_2O 排放通量及其影响因素[J]. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 144-150.
XU Hua, XING Guang-xi, ZHANG Han-hui. N_2O fluxes from rice fields in Taihu region and factors affecting them[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(suppl.): 144-150.
- [8] 黄树辉, 吕 军, 曾光辉. 水稻烤田期间 N_2O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(6): 1084-1090.
HUANG Shu-hui, LV Jun, ZENG Guang-hui. Nitrous oxide emissions and impact factors in paddy soil drying[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(6): 1084-1090.
- [9] 肖 玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 施肥对稻田生态系统气体调节功能及其价值的影响[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 577-583.
XIAO Yu, XIE Gao-di, LU Chun-xia, et al. The impact of urea amendments on atmospheric on atmospheric gas regulation services in rice paddy ecosystems and their valuation[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(4): 577-583.
- [10] 周再兴, 郑循华, 王明星, 等. 华东稻麦轮作农田 CH_4 、 N_2O 和 NO 排放特征[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(6): 751-760.
ZHOU Zai-xing, ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, et al. CH_4 , N_2O and NO emissions from a rice-wheat rotation cropping field in East China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(6): 751-760.
- [11] 熊正琴, 邢光熹, 施书莲, 等. 轮作制度对水稻生长季节稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1761-1764.
XIONG Zheng-qin, XING Guang-xi, SHI Shu-lian, et al. Effects of cropping systems on nitrous oxide emissions from paddy soils during the rice-growing season[J]. *Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1761-1764.
- [12] 蒋静艳, 黄 耀, 宗良纲. 环境因素和作物生长对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(6): 711-714.
JIANG Jing-yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang. Influence of environmental factors and crop-growing on emissions of CH_4 and N_2O from rice paddy [J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(6): 711-714.
- [13] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3): 294-298.
TIAN Guang-ming, HE Yun-feng, LI Yong-xian. Effect of water and fertilization management on emission of CH_4 and N_2O in paddy soil[J]. *Soils and Environmental Sciences*, 2002, 11(3): 294-298.
- [14] 黄国宏, 陈冠雄, 韩 冰. 土壤含水量与 N_2O 产生途径研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 53-56.
HUANG Guo-hong, CHEN Guan-xiong, HAN Bing. Relationships between soil water content and N_2O production[J]. *Applied Ecology*, 1999, 10(1): 53-56.
- [15] 齐玉春, 董云社. 土壤氧化亚氮产生、排放及其影响因素[J]. *地理学报*, 1999, 54(6): 534-542.
QI Yu-chun, DONG Yun-she. Nitrous oxide emissions from soil and

- some influence factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(6):534–542.
- [16] Letey J, Valoras N, Hadas A, et al. Effect of air-filled porosity, nitrate concentration, and time on the ratio of N_2O/N_2 evolution during denitrification[J]. *J Environ Qual*, 1980, 9:227–231.
- [17] 李香兰, 徐 华, 曹金留, 等. 水分管理对水稻生长期 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6):703–707.
LI Xiang-lan, XU Hua, CAO Jin-Liu, et al. Effect of water management on N_2O emission in rice-growing season [J]. *Soils*, 2006, 38(6):703–707.
- [18] 邓美华, 尹 斌, 张绍林, 等. 不同施量和施方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3):263–269.
DENG Mei-hua, YIN Bin, ZHANG Shao-lin, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soils*, 2006, 38(3):263–269.
- [19] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5):1–6.
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):1–6.
- [20] Xing G, Zhao X, Xiong Z, et al. Nitrous oxide emission from paddy fields in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29:45–50.
- [21] 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 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3):273–279.
ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impact of soil humidity on N_2O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Applied Ecology*, 1996, 7(3):273–279.
- [22] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4):482–489.
YAN Xiao-yuan, SHI Shu-lian, DU Li-juan, et al. N_2O emission from paddy soil as affected by water regime[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4):482–489.