

中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究的汇总分析

秦艳梅, 过燕琴, 高志亮, 张 令

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘 要 通过对已有文献资料的调研和整理,分析了 1990—2008 年间有关中国农田 N_2O 排放通量田间原位观测的分布特征。结果表明,1990—2008 年间中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究呈不断发展趋势,2002 年后进入快速增加期。通量原位观测位点的空间分布不平衡,主要集中在长江中下游、华北和西南地区,东北、西北、华南地区观测位点较少。农田 N_2O 排放通量原位观测在作物类型间差异明显,对稻田的研究占到数据组总数的 36%,其次为小麦和玉米田,分别占 24%和 21%,紫云英田仅为 0.2%。针对农田 N_2O 排放通量原位观测研究的现状,建议今后需进一步关注西北和东北典型农田生态系统 N_2O 排放观测研究。在测定大宗作物系统 N_2O 排放的基础上,重点加强典型菜地 N_2O 通量的原位观测。强调温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的同步观测与同位素示踪等技术相结合,以寻求农业增产、增效与温室气体减排的系统机制与实现途径。

关键词 农田 N_2O 排放 原位观测 分布特征 作物类型

中图分类号 X511 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2009)12-2608-06

A Summary of Field Studies on N_2O Measurements in Chinese Croplands During 1990—2008

QIN Yan-mei, GUO Yan-qin, GAO Zhi-liang, ZHANG Ling

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract A great many field measurements have been taken on nitrous oxide (N_2O) emissions in Chinese croplands in the past decades. To outline the development characteristics of field studies on agricultural N_2O emissions in China, we summarized available in situ measurements that were collected from published literatures during 1990—2008. The results indicated that the studies on agricultural N_2O in situ measurements from Chinese croplands had greatly increased over the past two decades, particularly since 2002. Most field N_2O measurements were taken in the Middle-and-lower Yangtze River, North and Southwest of China, as compared to few measurements in Northeastern, Western and Southern China. Field N_2O measurements had been primarily taken in rice paddies, wheat and corn cropping systems, accounting for 36%, 24% and 21% of the total studies, respectively, while Milk vetch only represented 0.2%. Based on the current status of field N_2O studies, therefore, we suggested that more agricultural N_2O measurements were needed to be taken in the northwest and northeast of China. More field studies should focus on N_2O emissions from vegetation production systems. Simultaneous measurements of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes by static chamber methods combined with isotope techniques would be of great importance to seeking a coupling mechanism and achievement approach for the increase of agricultural yield, high use efficiency of agricultural resources and mitigation of agricultural greenhouse gases.

Keywords cropland; agricultural N_2O emission; in situ measurement; distribution characteristic; cropping type

氧化亚氮 (N_2O) 是大气中重要的温室气体之一,其浓度已由 1750 年的 270 ppbv (10^{-9} 体积比) 上升到 2005 年的 319 ppbv,其导致的辐射强度增加了 $0.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}[1]$ 。 N_2O 参与大气中许多光化学反应,破坏大气 O_3 层^[2]。农业土壤是 N_2O 的重要排放源之一,其排放

的 N_2O 约占由人类活动排放 N_2O 总量的 60%^[3]。中国作为农业大国,其农田对全球 N_2O 的影响受到了国内外学者的广泛关注。20 世纪 90 年代初陈冠雄首次报道了有关农田土壤 N_2O 排放情况^[4],此后我国学者对农田不同生态系统 N_2O 进行了大量研究^[5-8]。特别是近二十年来我国学者对典型农田 N_2O 排放通量进行了观测,为合理准确估算中国农田 N_2O 排放总量和编制我国农田 N_2O 清单积累了许多田间原位观测资料。本文试图通过对国内外有关农田 N_2O 原位观测研究的文献资料调研和分析,阐明 1990—2008 年间有关

收稿日期 2009-08-12

基金项目 教育部博士点基金 (200803071010) 中国博士后科学基金 (200801379,20080430173)

作者简介 秦艳梅 (1982—),河南周口人,博士研究生,研究方向为陆地生态系统碳氮循环与温室气体。

E-mail qinyanmei103103@163.com

中国农田 N_2O 研究资料的分布特征,以期为今后调整农田 N_2O 原位观测研究的策略提供参考。

1 材料与方法

作者收集和整理了 1990—2008 年间发表于中文和英文期刊上关于我国农田 N_2O 直接排放的田间原位测定资料。中文资料来自于中国期刊网全文数据库,英文报道结果来自于科学引文索引 (SCI) 数据库,中英文重叠发表的结果只计算一次。

本研究未考虑盆栽试验和室内培养试验的 N_2O 排放测定结果,较正常生育期较短的农田 N_2O 原位测定结果^[9],只测定生育期中某一段时间 N_2O 的原位测定结果也被排除在外,但其文献被包含在所统计的文献总数中^[4]。硝化抑制剂或使用缓释氮肥的研究结果与常规化肥具有不同的 N_2O 排放规律,因此未包含在内^[10,13]。只有肥料施用量而没有所对应的 N_2O 排放通量的数据也被排除在外^[11-12,14],但其文献被包含在所统计的文献总数中,而有关模型运行所得结果也未被采用,同时其文献也被排除在外^[15]。所收集的数据涵盖年份从 1990 至 2008 年,对每一组数据作者收集了 N_2O 季节排放量、化肥施用量、所施用有机肥中 N 的量、试验地概况和作物生育期等。所有 N_2O 排放通量的原位测定采用了静态暗箱-气相色谱法,最后作者从 193 篇相关文献中获得 535 组有效数据。

2 结果与讨论

2.1 农田 N_2O 排放原位观测研究的年际变化

1990—2008 年间中国农田 N_2O 排放原位观测研究呈现增加态势,2002 年后进入快速增加期 (图 1)。自陈冠雄于 1990 年首次报道了农田土壤释放 N_2O 的原位测定结果后^[4],20 世纪 90 年代有关农田 N_2O 排放的原位观测研究呈缓慢发展,在 2003 年之前有关农田 N_2O 通量观测研究报道年均在 8 篇左右,2003 年增加明显,近几年呈现快速发展趋势,2007 与 2008 年农田 N_2O 通量观测资料的报道每年达 25~28 篇 (图 1)。出现上述情况的原因可能有如下几个方面:

(1) 中国农田温室气体的系统研究始于 20 世纪 80 年代的稻田 CH_4 通量原位观测,农田 N_2O 排放通量的系统观测起步较晚。

(2) 20 世纪 90 年代有关农田 N_2O 排放通量观测研究主要集中在中国科学院土壤研究所、沈阳应用生态所和大气物理研究所,以及中国农业科学院等单位,而以学校为单位参与研究的较少。

(3) 随着全球变化加剧,我国温室气体减排压力增加,政府和社会对温室气体排放的关注程度加强,近五六年来有关农田温室气体排放的科研投入显著增加,越来越多的农业院校和综合性大学相继开展了农田 N_2O 排放通量的观测研究。

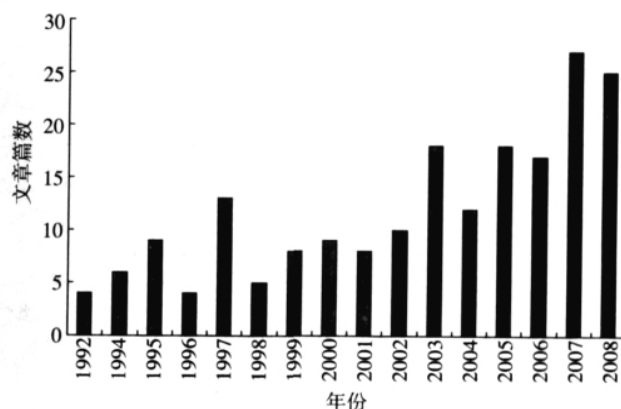
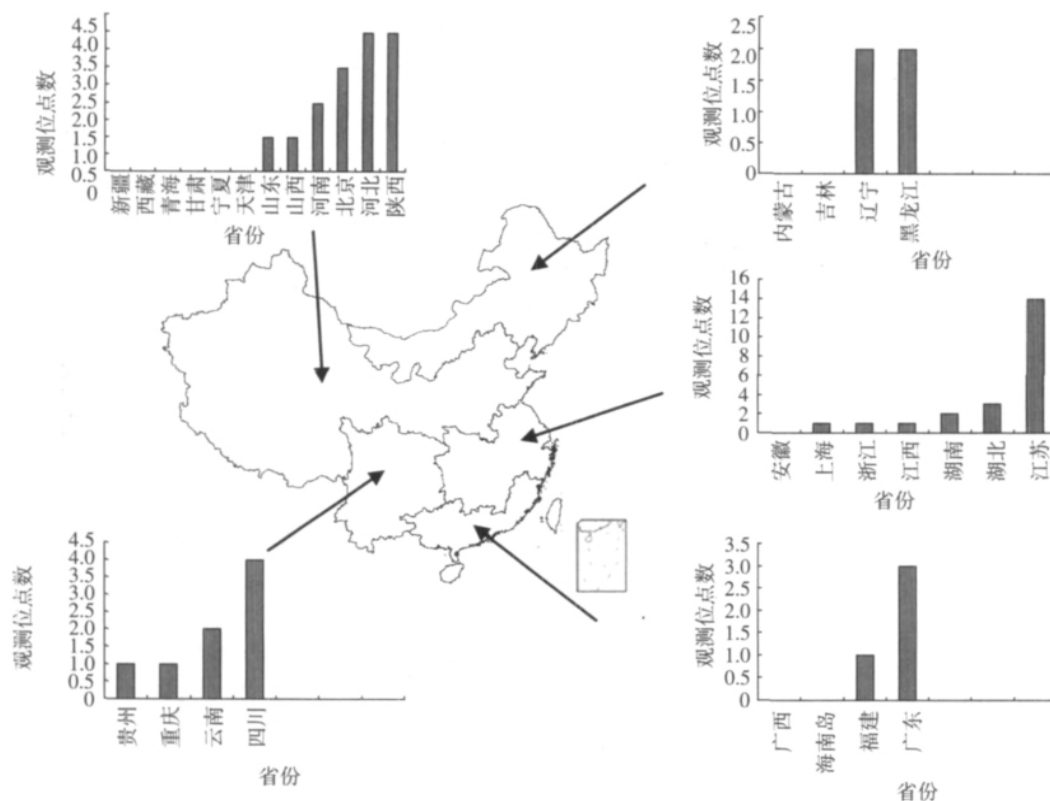


图 1 农田 N_2O 排放通量原位观测研究报道的年际变化
Figure 1 The number of field studies N_2O measurements in croplands increased over the period 1990—2008

2.2 农田 N_2O 通量原位观测研究的区域分布

过去的近二十年间中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究的区域位点分布不平衡,主要集中于长江中下游、华北和西南地区,东北、西北、华南地区观测位点较少 (图 2),其中长江中下游地区观测位点数占总数的 39%,华北、西南分别为 22%、16%,而东北、西北、华南地区观测位点数均为 8%。同一区域各省份之间也存在差异,长江中下游观测位点主要分布在江苏省、湖北省、湖南省,安徽省没有观测位点分布,华北地区集中分布在北京市、河北省、河南省,山西省和山东省较少,天津市没有观测点,华南地区主要集中在广东省,西部地区观测点主要分布在陕西省,宁夏回族自治区、甘肃省、青海省、西藏自治区、新疆维吾尔自治区没有观测位点分布,东北地区位点分布主要集中在黑龙江省和辽宁省,吉林省和内蒙古自治区没有观测位点。观测点分布最多省份是江苏省,这些观测位点主要由中国科学院南京土壤所、大气物理所和南京农业大学等单位先后设置。

长江中下游地区、华北平原、东北地区是我国主要农作物水稻、小麦、玉米的生产基地,为了提高作物产量氮肥大量施用,而氮肥又是导致 N_2O 排放的主导因子;随着稻田水分管理方式由持续淹水变为淹水-中期烤田-淹水与淹水-中期烤田-后期湿润灌溉,导致了稻田 N_2O 排放量增加^[16]。造成上述局面的另一个原因可能为各地区的经济发展不同。

图 2 农田 N_2O 通量观测位点的区域分布Figure 2 Regional distribution of field N_2O measurement sites

2.3 农田 N_2O 通量观测研究在作物类型间的差异

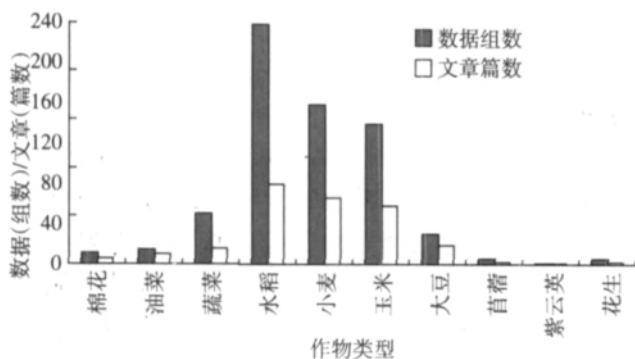
图 3 为 1990—2008 年间农田 N_2O 研究在作物类型间的差异,从图中可以看出,无论是按数据组数还是按文章篇数划分,1990—2008 年间有关稻田 N_2O 排放的原位观测研究报道居多,占总报道数的 35%~36%,其次是小麦田与玉米田所占份额分别为 24%~28%和 21%~25%,而对蔬菜、油菜、棉花田 N_2O 排放原位观测研究起步较晚,缺乏系统性。蔬菜地 N_2O 通量观测研究占数据组总数的 8%,油菜、棉花分别仅占 2.2%与 1.6%。有关豆科作物花生和紫云英田块 N_2O

的原位观测研究更少,如紫云英 N_2O 的原位观测研究在数据组数和报道篇数的比例分别仅为 0.2%与 0.5%。农田 N_2O 研究在作物类型间差异明显主要与我国农作物种植结构有关。水稻、小麦、玉米是我国三大农作物,种植面积广,其中水稻的种植面积占到我国耕作总面积的 23%左右,对豆科作物的研究大部分集中在具有代表性的作物大豆上,而种植面积较少的紫云英田常被忽视。

2.4 建议

2.4.1 农田 N_2O 通量观测点分布的空间转变

农田 N_2O 排放通量原位观测点空间分布差异明显(图 2)。新疆是我国重要的棉花生产基地,虽然目前新疆将进行农业结构调整,压缩棉花种植面积,相应的其他农作物种植面积将会增加。截止 2008 年新疆农业种植面积达到了 370 多万 hm^2 ,为了提高作物产量,氮肥被普遍施用到农田中,2008 年氮肥施用量为 140 万 t,以氧化亚氮排放系数 1.64%^[17]计算,2008 年新疆农田 N_2O 排放量约为 0.03 Gg,此 N_2O 排放量相当可观;安徽省是我国粮棉种植区域,农作物种植面积广,而其他几省均有农作物与经济作物的分布,其农田 N_2O 排放量不容忽视。当前《京都议定书》已经

图 3 农田 N_2O 通量观测在不同作物间的分布Figure 3 Field N_2O measurements in various cropping systems

生效,根据该公约规定,所有签约国或地区提交一份温室气体排放量或转化量的国家清单,提出为实施该公约的原则和目标所采取的步骤和行动。IPCC (2000) 还要求编制由农业活动所产生的 N_2O 排放量的国家清单。为了能够使我国所提交的 N_2O 排放清单更能接近农田 N_2O 实际排放量,建议观测位点的分布应尽可能覆盖我国的农业主产省份。

2.4.2 农田 N_2O 通量观测研究在作物种类间的转变

农田是 N_2O 重要释放源,而水稻是我国重要的粮食作物之一,种植面积占我国耕地总面积的 23% 左右,随着稻田水分管理方式由持续淹水变为淹水-中期烤田-淹水与淹水-中期烤田-后期湿润灌溉,导致了稻田 N_2O 排放量增加,稻田 N_2O 排放量在总量中的份量较重,而有关稻田 N_2O 排放的研究起步较早,目前有关稻田中 N_2O 排放机理^[18]、排放途径^[19]、日排放与季节排放规律^[20]、各种因素对稻田 N_2O 排放影响^[20]、减排措施^[21]、综合各种因子建立模型^[17]和稻田中 N_2O 排放量的估算等情况研究报道较多^[22-23]。

菜地施肥多、浇水勤,过多施肥和频繁灌溉由此引发的 N_2O 排放量较多。郑循化等^[24]对 20 世纪 90 年代我国农田 N_2O 排放量进行了估算,其排放量为 $275 \times 10^9 \text{ gN}_2\text{O}-\text{N} \cdot \text{a}^{-1}$,菜地排放量占总排放的 20%。姚志生等^[25]在太湖地区对相邻的蔬菜地和稻麦轮作生态系统的冬小麦田研究表明,与旱地阶段农田相比,蔬菜地有较高的 N_2O 排放量。随着我国经济发展和城镇化水平提高,蔬菜生产在我国种植业结构中的比重越来越高,特别是最近十几年蔬菜面积占耕地面积的比例近似直线上升。与 1970 年相比,2000 年蔬菜面积增加了 5 倍多,占耕地面积比例相应增加了 351%。2002—2004 年全国蔬菜收获面积已占我国耕地总播种面积的 11.4%~13.9%,随着蔬菜种植面积增加,由此所导致的 N_2O 排放在农田排放总量中所占份额越来越重,而目前对蔬菜的研究起步较晚,研究不多,菜地 N_2O 排放采用田间原位测定方法较少。为了使有关农田 N_2O 问题得到更全面的探讨及农田 N_2O 排放量估算更精确,建议加强蔬菜田 N_2O 原位观测的研究。

2.4.3 农田 N_2O 排放过程研究与同位素技术相结合

硝化作用和反硝化作用是农田土壤氮素循环的两个重要途径,也是产生 N_2O 的关键过程^[26],因此影响硝化与反硝化过程的因子均会影响农田 N_2O 排放。稳定性核素 ^{15}N 示踪作为一种有效的手段在农田氮素研究中有广泛的应用。目前已证实土壤氮素反硝

化是微生物引起的生物化学还原过程,测定反硝化损失量可用 ^{15}N 平衡差值法和 ^{15}N 示踪气体直接法,其中 ^{15}N 平衡差值法的前提是忽略氮的淋失损失,将氮的总损失量减去氮挥发量,差值即为硝化-反硝化的损失量,也称表观反硝化损失量。1974 年,我国开始利用 ^{15}N 示踪技术研究化肥氮在土壤中的去向。1980 年以后,这种研究逐步扩展到主要农区的主要作物和主要氮肥品种,并涉及不同损失途径的定量评价。倪吾钟等^[27]通过不同氧化还原条件下 ^{15}N 标记硝态氮反硝化作用的培养试验,结合 ^{15}N 气态损失的直接测定方法,研究了反硝化作用发生的氧化还原条件。结果表明,氧化和还原条件下均能进行硝态氮的反硝化作用,在 4 周的培养试验期间,直接测得的氧化还原条件下的 ^{15}N 气态损失分别占加入量的 60.23% 和 83.89%,但是氧化条件下反硝化作用速率明显减缓。稳定性核素 ^{15}N 示踪技术应用加深了对农田 N_2O 排放过程机理的认识。

2.4.4 农田温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的同步观测和同位素技术相结合

1990—2008 年期间,在所统计的文献中,农田温室气体 CO_2 、 CH_4 与 N_2O 通量的同步观测的文献在 2003 年之前较少^[20],2003 年之后逐渐出现并且呈现上升趋势,按数据组数划分表现为 2003 年的 22% 到 2005 年的 27% 再上升到 2007 年的 37%。此数据显示对农田温室气体的研究不在局限于单一温室气体,综合研究 3 种温室气体是未来农田温室气体研究的趋势。由于农田生态系统碳、氮循环受到多种因素的综合影响,且具有很高的时空变异性,对农田生态系统碳循环和氮循环的研究需要从多尺度、多方面开展工作。稳定性同位素技术以其具有可以区分农田生态系统的各组成部分对 CO_2 通量的贡献近几年来逐渐得到了广泛的应用。农田生态系统碳、氮循环的生理生态过程研究是解释和论证通量观测结果的必要手段,因此加强农田温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的同步观测与碳、氮同位素技术相结合有利于深入研究农田碳、氮循环过程。

2.4.5 农业增产、增效与温室气体减排协同机制与实现途径

据统计我国耕地面积在 1985—1999 年的 14 年间平均每年减少 34.9 万 hm^2 ,按此速度计算,全国耕地面积将由 1999 年的 1.3 亿 hm^2 减少到 2030 年的 1.2 亿 hm^2 ,人均耕地将减少到 0.07 hm^2 ^[28]。当前我国农业正面临着人均耕地不断减少的问题,为了确保粮

食安全,农业的增长、增效显得尤为重要。化肥被认为是粮食增产的主要贡献者,据联合国粮农组织估计,发展中国家粮食增产中的 55%来自于化肥的作用,化肥施用在提高粮食产量的同时也导致了温室气体排放。因此农业增产、增效与温室气体减排相结合,有利于寻求最佳的经济效益和环境效益。增加土壤有机碳有利于减少农田 CO_2 排放,IPCC 第四次评估报告^[3]指出全球农业固碳与温室气体减排的自然总潜力高达 $5\,500\sim 6\,000\text{ MtCO}_2\text{-eqa}^{-1}$,其中 90%来自减少土壤 CO_2 释放(即固定土壤碳),有关增加土壤有机碳,减少农田 CO_2 排放的措施有:注重化肥与有机肥的配合施用、推广少耕与免耕技术、提高秸秆与有机物质的归还量。而对于农田中存在消长关系的 N_2O 与 CH_4 而言,在讨论减排措施时应两者兼顾。采用合理的水分管理方式,有研究表明间歇灌溉能有效地抑制温室气体排放并显著降低 CH_4 和 N_2O 的温室效应^[29-30]。水稻新品种与研制甲烷抑制剂对减少农田 CH_4 排放有很好的效果,有研究表明使用控释氮肥可减少 20%的 N_2O 排放^[31]。合理的施肥方式对较少农田 N_2O 排放有明显的作用。李鑫等^[32]研究表明,尿素表施氧化亚氮排放量为施氮量的 1.94%,而穴施仅 1.67%;高 C/N 比植物残体施用可以调控土壤 C、N 转化过程以减少 N_2O 排放。

3 结论

分析 1990—2008 年间中国农田 N_2O 排放通量田间原位观测的分布特征,结果表明:1990—2008 年间中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究呈不断发展趋势,2002 年后进入快速增加期。通量原位观测位点的空间分布不平衡,主要集中于长江中下游、华北和西南地区,东北、西北、华南地区观测位点较少。长江中下游地区观测位点数占总数的 39%,华北、西南分别为 22%、16%,而东北、西北、华南地区观测位点数均为 8%。农田 N_2O 排放通量原位观测在作物类型间差异明显:无论是按数据组数划分还是按文章篇数划分,水稻田所占份额均最大分别为 36%、35%;其次是小麦田与玉米田分别为 24%、28%与 21%、25%;而对豆科作物中紫云英田研究仅占 0.2%、0.5%。因此,作者建议加强我国农业主产省的典型农田生态系统 N_2O 排放观测研究,特别是对蔬菜田及豆科作物田块进行 N_2O 的系统观测,强调温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的同步观测和同位素技术相结合,以揭示农业增产、增效与温室气体减排协

同机制,并寻求其实现途径。

参考文献:

- [1] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing[M]//Climate change 2007: The physical science basis, contribution of working group I to the Fourth assessment report of panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- [2] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 25: 1105-1111.
- [3] IPCC. Agriculture[M]//Climate Change 2007: Mitigation of climate change, contribution of Working Group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- [4] 陈冠雄, 商曙辉, 吴杰, 等. 土壤释放的 N_2O 的原位测定[J]. 生态学杂志, 1990, 9(2): 59-62.
CHEN Guan-xiong, SHANG Shu-hui, WU Jie, et al. Measurement of N_2O evolved by soil in situ[J]. *Journal of Ecology*, 1990, 9(2): 59-62.
- [5] 苏维瀚, 宋文质, 张桦, 等. 华北典型冬麦区农田氧化亚氮通量[J]. 环境化学, 1992, 11(2): 26-32.
SU Wei-han, SONG Wen-zhi, ZHANG Ye, et al. Flux of nitrous oxide on typical winter wheat field in northern China[J]. *Environmental Chemistry*, 1992, 11(2): 26-32.
- [6] 陈冠雄, 黄国宏, 黄斌, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 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. CH_4 and N_2O emission from a rice field and effect of azolla and fertilization on them[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 378-382.
- [7] 于克伟, 陈冠雄, 杨思河, 等. 几种旱地农作物在农田 N_2O 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 N_2O emission from farmland and response to environmental factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 387-391.
- [8] 梁东丽, 同延安, Ove Emteryd, 等. 菜地不同施氮量下 N_2O 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 $\text{NO}_3\text{-N}$ [J]. *Journal of Northwest Science-Technology University of Agriculture and Forestry*, 2002, 28(2): 73-77.
- [9] 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): 144-149.
XU Hua, XING Guang-xi, ZHANG Han-hui. N_2O emission from paddies field and its influencing factors in Taihu region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(suppl): 144-149.
- [10] 梁巍, 张颖, 岳进, 等. 长效氮肥施用对黑土旱田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 44-48.
LIANG Wei, ZHANG Ying, YUE Jin, et al. Effect of slow-releasing nitrogen fertilizers on CH_4 and N_2O emission in maize and rice fields in black earth soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(3): 44-48.
- [11] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 20-23.

- HUANG Yao, JIANG Jing-yan, ZONG Liang-gang, et al. Influence of planting density and precipitation on N_2O emission from a winter wheat field[J]. *Environmental Science*, 2001, 22 (6) : 20-23.
- [12] 高秀文. 华北高产粮区土壤温室气体排放及碳氮平衡研究[D]. 北京 中国农业大学资源与环境学院, 2003 : 1-53.
- GAO Xiu-wen. Greenhouse gases emission from soil and carbon-nitrogen budget in the northern China Plain with high productivity[D]. Beijing College of Resources and Environmental Sciences, Beijing Agricultural University, 2003 : 1-53.
- [13] 史 奕, 黄国宏. 土壤中反硝化酶活性变化与 N_2O 排放的关系[J]. 应用生态学报, 1999, 10 (3) : 329-331.
- SHI Yi, HUANG Guo-hong. Relationship between soil denitrifying enzyme activities and N_2O emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10 (3) : 329-331.
- [14] 张中杰, 朱 波, 江长胜, 等. 川中丘陵区旱地小麦生态系统 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放特征[J]. 生态学杂志, 2005, 24 (2) : 131-135.
- ZHANG Zhong-jie, ZHU Bo, WANG Chang-sheng, et al. CO_2 , N_2O and CH_4 emission from dry-land wheat ecosystem in hilly area of central Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (2) : 131-135.
- [15] 孙园园. 川中丘区稻田生态系统温室气体排放研究——以四川省金堂县为例[D]. 成都 四川农业大学, 2007 : 1-53.
- SUN Yuan-yuan. Research of tillage-cropping systems on greenhouse gas emissions from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of Southwest China : In case of Jintang in Sichuan Province[D]. Chengdu Sichuan Agricultural University, 2007 : 1-53.
- [16] ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emission from rice paddies in China : Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycle*, 2005, GB2021, doi : 10.1029/2004GB002401.
- [17] 卢燕宇, 黄 耀, 郑循华. 农田氧化亚氮排放系数的研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16 (7) : 1299-1302.
- LU Yan-yu, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua. N_2O emission factor for agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (7) : 1299-1302.
- [18] YAN Xiao-yuan, SHI Shu-lian, DU Li-juan, et al. Pathways of N_2O emission from rice paddy soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32 (3) : 437-440.
- [19] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放[J]. 大气科学, 1997, 21 (2) : 104-110.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. CH_4 and N_2O emissions from rice paddy fields in southeast China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, 21 (2) : 104-110.
- [20] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23 (6) : 758-764.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23 (6) : 758-764.
- [21] 李香兰, 徐 华, 蔡祖聪. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (6) : 2123-2130.
- LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong. Trade-off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27 (6) : 2123-2130.
- [22] CHEN Guan-xiong, HUANG Bin, XU Hua, et al. Nitrous oxide emission from terrestrial ecosystems in China[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2 : 373-378.
- [23] 卢燕宇. 基于模型和 GIS 技术的中国农田化学氮源 N_2O 直接排放量估计[D]. 南京 南京农业大学, 2007 : 1-108.
- LU Yan-yu. Estimation of fertilizer-induced direct N_2O emission from Chinese agricultural fields based on integration of model and GIS technology[D]. Nanjing Nanjing Agricultural University, 2007 : 1-108.
- [24] ZHENG Xun-hua, HAN Sheng-hui, HUANG Yao, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, GB2018, doi : 10.1029/2003GB002167.
- [25] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N_2O 排放对比观测研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11 (6) : 691-701.
- YAO Zhi-sheng, ZHENG Xun-hua, ZHOU Zai-xing, et al. Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu Region : A comparison case study[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11 (6) : 691-701.
- [26] Bremner J M. Source of nitrous oxide in soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49 : 7-16.
- [27] 倪吾钟, 沈仁芳, 朱兆良. 不同氧化还原电位条件下稻田土壤中 ^{15}N 标记硝态氮的反硝化作用[J]. 中国环境科学, 2000, 20 (6) : 519-523.
- NI Wu-zhong, SHEN Ren-fang, ZHU Zhao-liang. Denitrification of ^{15}N labeled nitrate-N in rice field soil under different redox conditions[J]. *China Environment Science*, 2000, 20 (6) : 519-523.
- [28] 高 瑛. 基于粮食安全保障的我国粮食产销利益协调机制研究[D]. 南京 南京农业大学, 2006 : 1-149.
- GAO Ying. A study on interests-coordination mechanism of grain produce and sale based on food security[D]. Nanjing Nanjing Agricultural University, 2006 : 1-149.
- [29] 袁伟玲, 曹凌贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41 (12) : 4294-4300.
- YUAN Wei-ling, CAO Cou-gui, CHENG Jian-ping, et al. CH_4 and N_2O emissions and their GWPs assessment in intermittent irrigation rice paddy field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (12) : 4294-4300.
- [30] 李香兰, 马 静, 徐 华, 等. 水分管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放季节变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (2) : 535-541.
- LI Xiang-lan, MA Jing, XU Hua, et al. Effect of water management on seasonal variations of methane and nitrous oxide emissions during Rice growing period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27 (2) : 535-541.
- [31] CHENG W, Nakajima Y, Sudo S, et al. N_2O and NO emissions from a field of Chinese cabbage as influenced by band application of urea or controlled-release urea fertilizers [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63 : 231-238.
- [32] 李 鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氮挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19 (1) : 99-104.
- LI Xin, JU Xiao-tang, ZHANG Li-juan, et al. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (1) : 99-104.