

农田生态系统温室气体排放研究进展^{*}

李 晶 王明星 王跃思 黄 耀 郑循华 徐 新

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100083)

摘 要 自 1985 年起, 中国科学院大气物理研究所利用自行设计制造的自动观测仪器系统, 历时十六年先后对我国四大类主要水稻产区的甲烷排放规律及其与土壤、气象条件和农业管理措施的关系进行了系统野外观测实验, 并对稻田甲烷产生、转化和输送机理进行了理论研究, 探讨了控制稻田甲烷排放的实用措施, 建立了估算和预测稻田甲烷排放的数值模型。在甲烷排放的时空变化规律和转化率研究方面有一系列新的发现, 在稻田甲烷产生率、排放率及其与环境条件的关系方面取得一系列新的成果, 以充分证据改变了国际上关于全球和中国稻田甲烷排放总量的估算。在对稻田甲烷深入研究的基础上, 从 1993 年起又开展了对农田氧化亚氮排放的研究, 并在农田氧化亚氮排放的时空变化及环境控制因素, 特别是排放量与土壤湿度及温度的关系、施肥与排放、 CH_4 与 N_2O 排放相互消长关系及减排措施选择的理论与实验研究方面取得了新的研究成果。

关键词: 陆地生态系统; 甲烷 (CH_4); 氧化亚氮 (N_2O); 排放率; 二氧化碳 (CO_2)

1 引言

自工业革命以来, 人类活动对生物圈的影响已从区域扩展到全球^[1], 特别是大气中二氧化碳、甲烷、氧化亚氮和氯氟烃等温室气体的浓度一直在逐年增加^[2]。夏威夷 Mauna Loa 的观测结果表明, 在过去的 40 年间, 大气 CO_2 浓度已从 $315 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 增加到 $368 \mu\text{mol mol}^{-1}$, 增加了 16.8%, 平均增长率为 $0.42\% \text{ a}^{-1}$; 在过去 200 年中, 大气 CH_4 与 N_2O 浓度分别增加了约 145% 和 15%, 目前在背景大气中的浓度分别为 $1750 \text{ nmol mol}^{-1}$ 和 $315 \text{ nmol mol}^{-1}$ ^[3], 并仍分别以 $0.8\% \text{ a}^{-1}$ 和 $0.25\% \text{ a}^{-1}$ 的速率增长^[4]。人为活动是大气 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 浓度增长的主要原因^[3]。政府间气候变化专业委员会 (IPCC) 报告指出, 如果温室气体以目前的排放速率持续下去, 则地球表面的气温有可能每 10 年上升 0.2°C ^[5]。

目前, 温室气体排放引起的全球气候变暖和平流层臭氧的损耗已成为全世界面临的两大环境问题。 CH_4 与 N_2O 既是温室气体, 又影响平流层 O_3 , 从 20 世纪 80 年代初期开始, 对陆地生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的研究就倍受关注。粮食是人类赖以生存的根本, 而农田却是全球 CH_4 和 N_2O 主要排放源之一。20 世纪 80 年代末, IPCC 报告认为全球稻田 CH_4 排放量每年高达 110 Tg ^[4], 约占全球 CH_4 排放总量的 $1/5$ ^[3]。

中国是农业大国, 稻田面积仅次于印度, 居世界第二位^[6]。但是, 直到 20 世纪 80

年代末，中国对稻田 CH_4 排放的研究还很少，国外学者仅凭极其有限的观测资料进行简单的推算后给出中国稻田 CH_4 排放量达 $30\sim 50\text{ Tg a}^{-1[7]}$ ，约占全球稻田 CH_4 排放量的 $27\%\sim 45\%$ 。全球人为排放 N_2O 的 $60\%\sim 90\%$ 直接来源于农田施用氮肥^[4,8]，中国目前农田氮肥消费量约占全球的 $27\%^{[6]}$ ，施用氮肥直接导致的 N_2O 排放量约占全球的 $20\%^{[9]}$ 。因此，中国农田 CH_4 和 N_2O 排放问题受到国际社会的密切关注。

2 农田生态系统温室气体观测方法研究进展

目前，国内外测定陆地生态系统温室气体排放的方法主要是箱法和微气象法，其中以箱法中的静态箱/气相色谱法和微气象法中的涡度相关法最为常见。在中国，微气象法仍处在方法研究阶段，而静态箱法则已有 10 多年的应用历史，目前已趋于成熟。箱法原理简单、仪器廉价、操作容易、移动便利、灵敏度高，但是对观测对象有不同程度的扰动；微气象法原理较复杂、仪器昂贵、移动困难、灵敏度低，对观测对象的下垫面和大气稳定度要求较高，优点是对观测对象基本没有扰动，并且可以观测箱法无法观测的森林冠层与大气间微量气体的交换量。

中国的农田与欧美的比较，最大的特点是田块小、品种多且以半机械化的精耕细作为主。在农田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放观测中，微气象法难以适应中国农田的这种特点。因此，除森林冠层之外，估算中国陆地生态系统温室气体排放总量主要使用的是静态箱/气相色谱法。

中国对稻田 CH_4 排放的研究始于 1985 年^[10]。从 20 世纪 80 年代中期开始，中国科学院大气物理研究所（简称大气物理所）与德国埃琅和费大气环境研究所合作，先后在中国杭州、湖南桃源和江苏吴县，使用自动观测系统对稻田 CH_4 排放、产生和传输机制进行了大规模的田间观测实验研究^[11,12]；与美国俄勒冈科技研究生院（Oregon Graduate institute for Science and Technology）合作，使用人工观测系统在中国四川乐山地区和成都市郊对中国西南地区水稻田 CH_4 排放进行了长达 15 年的观测研究^[13]；使用自己研制的自动观测系统对中国华南、华东地区农田 CH_4 、 N_2O 和 NO 排放进行了实验观测与排放模式研究^[14~18]。

2.1 稻田 CH_4 自动采集和分析系统及其方法

稻田 CH_4 自动采样分析技术，是基于静态箱采样、气相色谱分析、积分仪记录及微机管理的一套全自动测定技术方法。其基本原理为：置于田间的采样箱获取富含 CH_4 的空气样品；样品自动注入实验室中的气相色谱仪，经分离柱分离出 CH_4 后，用氢焰离子检测器（FID）对其进行检测；用微机对检测数据进行记录和存储^[14]。该系统对 CH_4 分析误差 $< 0.5\%$ ，技术指标可与国外同类产品媲美，但其造价仅为国外产品的 $40\%\sim 50\%$ 。

2.2 农田氧化亚氮自动采样分析系统

农田氧化亚氮自动采样分析系统于 1996 年通过中国科学院技术成果鉴定。该系统的电路控制和机械装置借鉴了 CH_4 自动观测系统的技术，但色谱的氢焰离子检测器（FID）对 N_2O 无响应，因而采用电子捕获检测器（ECD）。但是， H_2O 、 CO_2 、 O_2 和 CFCs 对 ECD 检测 N_2O 干扰严重，常规方法不能使自动系统连续进样，否则色谱基线

会迅速抬升造成实验中中断。研究人员采用十通阀进样/反吹、四通阀外切技术,剔除了干扰,使分析系统可以连续进样,能够长期全天候观测。从 1994 年开始,该系统先后在北京、南京、苏州和内蒙古草原 4 个地区 5 家科研单位推广使用,均取得了良好的实验结果^[15,19]。

2.3 农田 CH_4 和 N_2O 自动观测系统的扩展和应用

通过对稻田 CH_4 观测技术和农田 N_2O 排放自动观测技术加以扩展,大气物理所于 1996 年设计制造出“农田 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 和 NO 联合观测系统”,又于 1997 和 1998 年分别设计出了适用于半干旱草原和水体生态系统温室气体排放观测的设备,并成功地应用于农田、森林土壤、草原和水体的 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 观测研究。1987~2001 年间,我们利用自动及人工采样分析系统分别在浙江、湖南、四川、江苏、广东和内蒙古对农田/草原生态系统的 CH_4 和 N_2O 进行了全面、系统的实验观测与研究,取得了大量宝贵的数据资料^[14, 15, 20, 21]。

3 稻田生态系统甲烷排放研究进展

在对中国华南(广东)、华中(湖南)、长江中下游(浙江和江苏)和西南(四川)等典型水稻产区展开长期、连续的实验观测和理论研究的基础上,我们对稻田 CH_4 排放规律及其与气象、施肥、水管理和土壤理化特性及水稻生长状况的关系进行了深入细致地研究。进一步,我们对稻田 CH_4 产生、转化及传输机理进行了系统的实验和深入的理论研究,并探讨了控制稻田 CH_4 排放的实用减排措施。我们的工作以确凿的实验数据改变了国际社会对中国稻田甲烷排放量过高的估计。

3.1 稻田甲烷排放的变化规律

很多研究认为影响稻田 CH_4 排放的主要因子仅为气温和土壤有机质含量,而日变化和季变化也主要受土壤湿度变化的影响^[22],而我们的研究得到了一些新的重要结果^[23, 24]。

(1) 引起 CH_4 排放率空间变化的主要因素,不仅有气温和土壤有机质含量,更重要的还有:施肥量、肥料种类(有机肥、化肥)、耕作制度、土壤性质[含砂量,有机质含量, pH 值,氧化还原电位(Eh)等]、水管理方式(间歇灌溉、淹灌、垄作、常湿润)。

(2) 稻田 CH_4 排放率的日变化表现为四种形式:一是下午出现峰值,二是晚间出现峰值,三是晚间、下午出现两个峰值,四是在阴雨天气条件下 CH_4 排放率呈现无规则的随机状态。日变化形式在计算日平均排放量和校准手动采样观测数据时有非常重要的作用。在晴天条件下,发生前三种规律性日变化,但究竟出现哪种规律性日变化形式完全取决于气泡、分子扩散及水稻植物体输送能力三者的相对重要性。

(3) 在水稻生长季内,稻田 CH_4 排放率的逐日(季节)变化一般出现三个季节性峰值:第一个出现在移栽后 15~25 天的水稻生长初期,对于未施新鲜有机底肥的稻田,这个峰值一般不明显;第二个峰值通常出现在温度最高、水稻生长最旺盛的水稻分蘖至抽穗开花期,这个峰值通常是由于高效率的传输过程造成的;第三个峰值出现在水稻生长末期,即开花期之后,这个峰值通常是由水稻根系分泌物及老根腐烂造成

的。

(4) 稻田 CH_4 排放率存在年际变化。这种现象不仅与水稻生长期间的影响因子（例如气候条件、施肥方式等）的年际差别有关，还与水稻生态系统的微生物体系的年际变化有关。

3.2 不同输送途径对稻田甲烷排放率的影响

在稻田甲烷的传输途径方面，近年的研究也有重要的突破和发现。这些进展也使一些甲烷排放率的变化规律得到解释（图 1）^[25]。

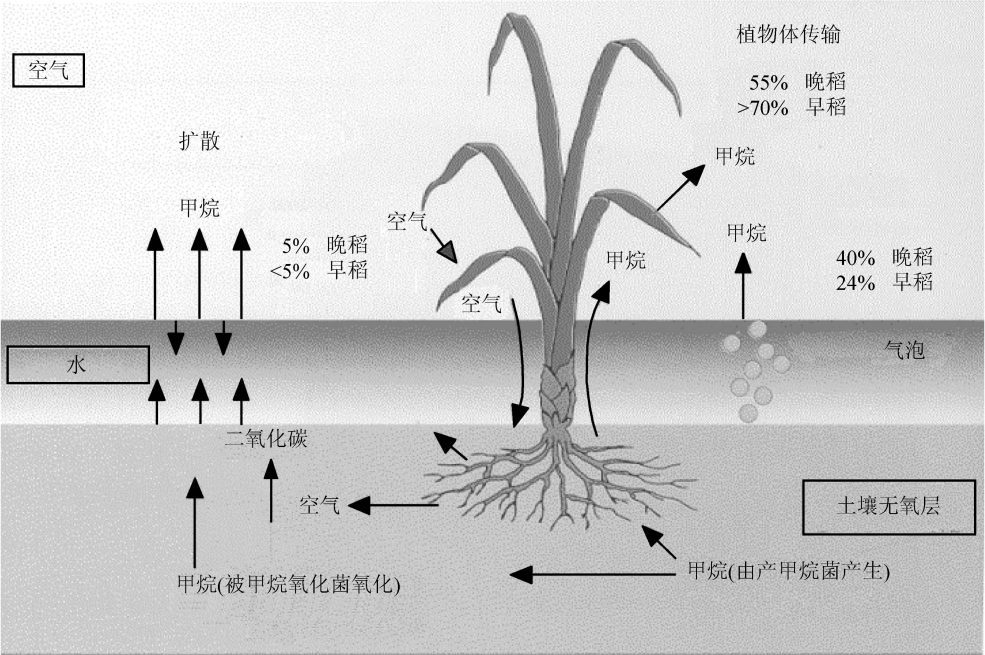


图 1 甲烷的产生排放和传输

(1) 土壤中 CH_4 产生率的日变化表现为无规则性，尤其是下午的稻田 CH_4 产生率明显小于上午。这一发现推翻了以前认为“ CH_4 产生率的日变化引起了所发现的排放率的日变化”的结论^[26]。实际上， CH_4 排放率的日变化是由三条 CH_4 输送路径的输送效率的变化造成的。土壤中 CH_4 产生率逐日（季节）变化与排放率逐日（季节）变化形式大体一致，但存在 1~2 天的时间差。

(2) 水稻植物体输送 CH_4 的能力是不断变化的。水稻刚移栽后，其传输能力基本为 0，随着水稻生长呈线性增长趋势，至抽穗中期达到最大，以后又不断下降。整个季节平均的结果，水稻植物体传输排放占总排放量的 70%（早稻）及 55%（晚稻）。这一研究结果证明，过去的研究^[22, 27]仅根据某一时段的观测结果就认为“水稻植物体输送占总排放率的 90%”是错误的。

(3) 气泡的作用要比过去估计的重要得多，在某些情况下达到将近 100%。整个季节平均的结果，气泡排放占总排放的 24%（早稻）及 40%（晚稻）。分子扩散则可被忽略，基本小于 5%。

(4) 土壤中产生的 CH_4 只有 12%（早稻）和 16%（晚稻）被排放到大气中，而其

余绝大部分在输送过程中被氧化了。因此，三条输送路径的输送效率对稻田 CH_4 排放率的影响更为重要。

3.3 环境因子对稻田甲烷排放的影响及减排措施

土壤温度的变化能明显地改变 CH_4 排放率，但排放率的变化与土壤温度之间存在 10~11 小时的滞后。考虑到 CH_4 产生率日变化的无规则性，温度的日变化导致 CH_4 传输能力的变化是产生 CH_4 排放日变化的本质原因^[28]。

使用新鲜有机肥是导致 CH_4 排放率高的重要原因，正确使用已充分发酵的有机肥（如沼渣、堆肥等）能较大程度地降低 CH_4 排放^[29]。实验证实，经过干燥处理的沼渣肥能够降低 CH_4 排放大约 50%，而未经处理的沼渣，由于向稻田土壤中带入产甲烷菌，排放量反而略有增加。同样地，施用堆肥（如堆腐半年左右的稻草）也几乎不会增加稻田 CH_4 排放。

采用中国水稻生产习惯耕作制度——晒田（或称烤田），可使稻田 CH_4 季节排放总量减少 26%~46%^[29]。

3.4 中国稻田甲烷的排放总量

采用中国几大水稻产区各类耕作制度下的稻田面积、水稻生长期、气象条件、土壤条件、施肥和水管理等参量，根据多年的实验数据和机理研究得到的环境因子和排放率之间的影响关系，我们估算出中国稻田 CH_4 排放总量约为 5~13 Tg a^{-1} ，远远小于以前国外学者估算的 30~50 $\text{Tg}^{[7]}$ 。我们的研究结果与知名学者 Neue 和 Sass1998 年给出的 9.0~13.5 Tg 比较一致^[30]。根据中国稻田 CH_4 排放的最新研究结果，全球稻田 CH_4 排放量被进一步确定为 35~50 $\text{Tg}^{[31]}$ 。这一结果改变了过去国际上对全球稻田 CH_4 排放的估计 110 Tg a^{-1} ，有力地支持了 IPCC 报告中关于全球稻田 CH_4 排放量的新估计约 60 $\text{Tg a}^{-1[3]}$ 。

4 农田氧化亚氮排放的研究进展

1993 年，我们开始对空气中的 N_2O 进行自动分析方法的研究。1994 年，我们将空气 N_2O 自动进样分析技术与田间采样技术耦合，制造出专利产品“农田 N_2O 自动采样分析系统”^[14, 32]，从而开始了对农田 N_2O 排放过程长达 7 年的研究。通过对华东稻麦轮作农田 N_2O 产生与排放进行了 3 年的连续观测，在 N_2O 排放时空变化、排放率与土壤湿度、温度和施肥的定量关系及农田 N_2O 排放与 CH_4 排放关系方面取得了一批新成果。

4.1 农田氧化亚氮排放的时空变化

(1) 实行常规水肥管理的华东稻麦轮作田 N_2O 排放的逐日变化具有明显的规律性，即以旱地阶段的排放为主，水稻生长期的排放量低于年排放量的 40%，显著排放发生在水稻生长期的施肥和排水阶段、秋季小麦播种前后以及春季泡田以前，冬季麦田和稻田淹水阶段几乎检测不到明显的 N_2O 排放。

(2) 农田 N_2O 排放的日变化表现为规律型和随机型两种形式。当土壤湿度适宜，养分供应充足且稳定，气温较高且日较差较大时， N_2O 排放表现为明显的单峰型日变化，日排放极大值发生在 11~16 时之间，土壤水分过饱和时，极大值出现在中午前

后，而水分不饱和时，极大值通常出现在下午。相反，当环境条件不稳定或日较差较小时，N₂O 排放的日变化没有规律性。由于农田土壤 N₂O 排放呈随机型日变化的情形居多，因此，自动连续观测对获得准确的日平均排放通量十分重要。

(3) 农田 N₂O 排放在不同空间尺度上均有很大的空间变异性，施肥、灌溉、作物类型、土壤类型和气候带差异都导致农田 N₂O 排放的空间差异。在东北淹水稻田和半干旱草原都曾观测到大气 N₂O 明显地被土壤吸收，而在华东地区的淹水稻田和旱地却没有观测到类似现象，土壤性质不同可能是导致这种差异的主要原因^[16]。

4.2 农田氧化亚氮排放与环境因子的关系

4.2.1 农田氧化亚氮产生与排放和土壤湿度的关系

田间条件 N₂O 排放与土壤湿度的关系可以表示为

$$F = \begin{cases} Ae^{-B(x-C_0)^2+Dx^{Ex}} & (x \leq 110\%) , \\ Ae^{-B(x-C_0)^2+e^Gx^{-H}} & (x > 110\%) , \end{cases}$$

其中， x 为土壤湿度，用实际土壤含水量占田间持水量的百分比 (SWHC) 表示， F 为 N₂O 排放通量。根据上式，当土壤湿度 $x=110\%$ (SWHC) 时，稻麦轮作农田的 N₂O 排放率最大，这与 Davidson 在草原和森林土壤上的研究结果不同^[33]，说明阶段性干湿交替的农田生态系统产生和排放 N₂O 的最佳土壤湿度条件不同于长期保持良好通气状况的草原和森林土壤^[34]。

4.2.2 农田施用化学氮肥的氧化亚氮排放因子

根据长期连续观测实验结果，我们得出水稻田施用化学氮肥直接导致 N₂O 排放的排放因子为 $0.60 \pm 0.45\%$ ^[16]，而《1996 IPCC 温室气体排放清单编制指南》推荐的化肥氮的 N₂O 排放因子为 1.25% ，这个数值没有考虑水稻田和旱作田 N₂O 排放所存在的固有差别，直接采用它来估算 N₂O 排放清单，会过高估计水稻田的 N₂O 排放量，区分水稻田和旱地而采用不同的排放因子对水稻生产大国编制农田 N₂O 排放清单尤为重要。

4.2.3 有机肥对农田氧化亚氮排放的影响

施用秸秆堆肥有利于减少稻麦轮作农田的 N₂O 排放量。实验室模拟也证明，土壤中添加有机质将会促进对大气 N₂O 的吸收^[35]。使用有机肥是中国几千年来传统农业持续发展的重要因素，使用有机肥可以有效减少农田 N₂O 排放，这对于中国未来农业的可持续发展将具有重要的意义^[28]。

4.2.4 稻田甲烷和氧化亚氮排放的相互关系

大量实验数据表明，稻田 CH₄ 和 N₂O 排放确实存在互为消长关系，直接导致稻田 CH₄ 和 N₂O 排放互为消长的关键因素是土壤水分状况^[17]。但同时也发现，尽管晒田 (落干或烤田) 措施在有效减少稻田 CH₄ 排放的同时，也明显增加了稻田 N₂O 的排放，然而，对于全年的 N₂O 排放总量和因这一措施减少的 CH₄ 排放而言，水稻生长期的晒田措施所增加的 N₂O 排放量是微不足道的。这一研究结果将打消对采用晒田措施来限制稻田 CH₄ 排放的疑虑。

4.2.5 稻田甲烷和农田氧化亚氮排放

如果考虑的时间尺度大于 20 年，稻麦轮作生态系统排放的 N₂O 对温室效应的贡献将大于它排放的 CH₄ 对温室效应的贡献。考虑到 N₂O 农田排放源的广泛分布和化学氮

肥用量仍在逐年增加的事实,全球农田排放的 N_2O 对温室效应的贡献在较短时期内就有可能超过稻田排放 CH_4 的贡献。因此,农田 N_2O 排放问题应当和稻田 CH_4 排放问题一样受到高度重视^[36]。

5 农田一氧化氮的排放研究进展

农田 NO 排放是 NO_x 的一个重要来源。农田排放 NO 不但损失土壤中的 N ,还会对大气环境造成危害。通过对中国农田 NO 排放观测研究,得到以下结果:

(1) 日变化 农田 NO 排放具有规律型、过渡型和随机型三种日变化形式,其中规律型日变化表现为截然不同的两种形式,一种是日间极大值型,另一种是夜间极大值型。究竟表现为哪种日变化形式,取决于植物根系和土壤硝化微生物对土壤铵态氮素竞争力的相对大小^[18]。

(2) 最佳人工实验时间 由于农田 NO 排放的日变化幅度较大,如果不连续测量的观测时间选择不当,又不对测量结果进行修正,那么,对农田 NO 排放的估计就可能偏高 12%~47%或偏低 18%~68%,因此,在观测时间选择不当时,必须对不连续观测结果加以日变化矫正。对于太湖地区旱作农田而言,进行 NO 排放不连续测量的最佳观测时间为 15:00~16:00,这时的观测结果无需修正就可以直接用于代表日排放状况。

(3) NO 排放与环境因子 温度、施肥和土壤水分状况是调节农田 NO 排放的关键环境控制因子。农田 NO 排放的可能减排途径主要有:减少化学氮肥施用量、将有机堆肥与化肥配合施用、在植物氮素吸收最旺盛的季节使用化肥、采取恰当的水肥管理措施,尤其是应当将稻田晒田与化肥施用两项农作措施在时间上错开。

6 农田 CH_4 、 N_2O 排放过程模式的研究进展

在开展大量实验研究的同时,我们相应开展了农田 CH_4 和 N_2O 排放过程模式的研究,并取得了良好的研究成果。

6.1 稻田 CH_4 排放模式研究

在多年的实验和理论研究的基础之上,我们建立起了基于水稻生长、有机质分解、土壤水力运动、气体扩散过程、 CH_4 产生和氧化、植物和气泡输送等过程的稻田 CH_4 产生与排放过程数值模式,更加准确地估算区域及全球的稻田甲烷排放量,正确描述气候、土壤特性、施肥、灌溉等环境因子和水稻品种对稻田甲烷产生、氧化和传输过程的影响,正确计算各种因子对甲烷排放量的影响,并可预测环境影响因子变化后甲烷排放的变化。只要正确输入关于气象条件、土壤特性、施肥类型和方式、灌溉制度、作物品种和种植方式的参量,就可以利用该模式计算出某一地点或区域的稻田 CH_4 排放率季节排放总量。该模式用于模拟湖南、浙江、四川、江苏地区的 CH_4 排放率的逐日变化,模拟结果与观测值相吻合。模式不仅通过了不同地区大量实验数据的验证,而且已经在一些重大国际合作项目中用于估算中国 1990 年的稻田 CH_4 排放清单,估算结果(即中国稻田甲烷年排放量为 9~13 Tg)也已得到国际同行专家的认可。该模式

还应用于中国国家信息通报中的温室气体排放清单的编制。除了用于估算稻田 CH₄ 排放清单外，该模式还可以用来进行稻田 CH₄ 减排方案的模拟研究和进行给定情景下区域、全国乃至全球稻田 CH₄ 排放变化趋势的预测研究^[37, 38]。

6. 2 农田 N₂O 排放模式研究

在 6 年的实验观测与理论研究上，项目组还建成了中国第一代农田生态系统 N₂O 排放过程模式，并引进了国际上较为先进的 DNDC 模式。对照研究表明：DNDC 模式仅对春季麦田 N₂O 排放模拟较好，对水田 N₂O 排放模拟误差较大，并且 DNDC 模式模拟中国农田生态系统 N₂O 排放总量偏低。自建模式无论对水田还是旱田 N₂O 排放均有良好的模拟^[39]。

7 进一步研究的展望

虽然稻田甲烷排放研究和农田氧化亚氮排放的研究取得了重大阶段性成果，但陆地生态系统温室气体排放问题远没有搞清楚，温室气体的源、汇探测仍是目前全球变化研究的重点前沿课题。未来主要的研究目标：一是为国家提供更为清晰准确的农田生态系统温室气体排放清单；二是研究陆地生态系统的碳氮循环问题，主要观测量为陆地生态系统与大气间 CO₂ 以及氮氧化物的交换量。

《联合国气候变化框架公约（UNFCCC）》要求所有签约国或地区提交一份温室气体排放量的国家清单，提出为实施该公约的原则和目标所采取的步骤和行动。中国是发展中国家，是世界上温室气体排放的第二大国，显然很快会在国际谈判中面临碳减排的问题。因此，各国政府在国家尺度上对碳的源/汇特征与碳平衡估算的研究以及 CO₂ 减排与增汇的研究都给予高度重视，这也是中国政府和科学家所面临的重要议题。N₂O 因其极强的温室效应和对对流层 O₃ 的作用已经越来越受到重视，不久的将来也会同 CO₂ 一样被提上国际谈判的日程。

研究表明，陆地生态系统碳循环对全球碳平衡起着重要的作用。中国地域辽阔，陆地生态系统富有多多样性，典型的陆地生态系统包括森林生态系统、农田生态系统和草原生态系统等。我们将以中国生态系统研究网络（CERN）29 个生态系统野外观测站为实验平台，展开对中国陆地生态系统碳氮循环的研究；以森林、草原和农田生态系统为对象，着重研究中国陆地生态系统碳源/汇强度的现实时空分布格局，环境因子和人类活动对陆地生态系统碳氮循环过程的影响，全球变化下陆地生态系统碳氮循环过程的演变趋势，增加陆地生态系统固碳潜力及其对减少排放的对策与技术。

参 考 文 献

1 Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco et al., Human domination of Earth's ecosystems, *Science*, 1997, **277**, 494~499.
2 Rodhe, H., A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect, *Science*, 1990, **248**, 1217~1219.
3 IPCC, Climate Change 1995, Summary for policymakers: the science of climate change, in: IPCC Second Assess Report, 1995, 21~24.

- 4 IPCC, Global Change: The initial core projects, Report No. 12, International Geosphere and Biosphere Program, 1990.
- 5 Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander et al. (Eds.), Climate change 1995-The science of climate change; contribution of working group I to the second assessment report of the international panel on climate change, Cambridge University Press, UK, 1996.
- 6 国家统计局农村社会经济统计司, 中国农村统计年鉴, 北京: 中国统计出版社, 1996.
- 7 Khalil, M. A. K., R. A. Rasmussen, and Wang Mingxing, Methane emissions from rice fields in China, *Environ. Sci. Technol.*, 1991, **25**, 979~981.
- 8 FAO & IAEA, Measurement of methane and nitrous oxide emission from agriculture, A Joint Undertaking by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1992, 5~6.
- 9 IPCC, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Bracknell, UK, 1996.
- 10 王明星等, 稻田和沼气池 CH_4 排放通量的测量, 科学通报, 1987, **21**, 1646~1649.
- 11 戴爱国、王明星等, 我国杭州地区秋季稻田的 CH_4 排放, 大气科学, 1991, **15**, 102~110.
- 12 Wang Mingxing, W. Seiler, and R. A. Rasmussen, Source of methane in China: Rice fields, Cattle, Coal mines, Sewage treatment and other Minor sources, Proceedings of the 10th international work shop on CH_4 and N_2O , Tsukuba, Japan, March, 1992.
- 13 Wang Mingxing, M. A. K. Khalil, and R. A. Rasmussen, 1988, CH_4 flux from biogas generators and rice paddies as measured in Sichuan, *Science Bulletin in China*, 1988, **33**, 942~947.
- 14 王跃思、王明星、郑循华等, 农田 $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4$ 通量自动观测系统, 中国科技大学研究生院学报, 1997, **14** (1), 17~22.
- 15 王跃思、郑循华、王明星等, 静态箱法气相色谱法自动检测农田 N_2O 排放, 分析测试技术与仪器, 1997, **3** (1), 10~15.
- 16 郑循华、王明星、王跃思等, 华东稻麦轮作生态系统 N_2O 排放过程研究, 应用生态学报, 1997, **8** (5), 495~499.
- 17 郑循华、王明星、王跃思等, 华东稻田 N_2O 和 CH_4 排放, 大气科学, 1997, **21** (2), 231~237.
- 18 郑循华、王明星、王跃思等, 农田 NO 排放自动观测, 环境科学, 1998, **19** (2), 1~5.
- 19 王跃思等, 北京大气中的 N_2O 浓度观测, 资源生态环境网络研究动态, 1994, **5** (1), 30~34.
- 20 王跃思、王明星, 北京大气甲烷季变化及发展趋势, 大气科学, 2000, **24** (2), 157~164.
- 21 王跃思、纪宝明、王明星等, 半干旱草原地—气温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 交换速率测定方法研究, 环境科学, 2000, **21** (3), 6~10.
- 22 Schütz, H., Seiler, W., and Conrad, R., Processes involved in formation and emission in rice paddies, *Biogeochemistry*, 1989, **7**, 33~53.
- 23 王明星, 中国稻田甲烷排放, 北京: 科学出版社, 2001.
- 24 Wang Mingxing et al., CH_4 Emission from a Chinese Rice Paddy Field, *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, **4** (3), 265~275.
- 25 王明星、李晶、郑循华, 稻田甲烷排放、产生、转化、输送机理, 大气科学, 1998, **22** (4), 600~612.
- 26 Holzapfel-Pschorn A., and Seil W., Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy, *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**, 11803~11814.
- 27 Isamu Nouchi, et al., Methane Transport from the Rhizosphere to the Atmosphere through Rice Plants, *Plant Physical.*, 1990, **94**, 59~66.
- 28 上官行健、王明星、沈壬兴, 温度对稻田 CH_4 排放日变化及季节变化的影响, 中国科学院研究生院学报, 1994, **11** (2), 214~224.
- 29 Li Jing, Wang Mingxing, and Chen Dezhang, Mitigation technologies assessments on methane emission from rice paddies, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, **22** (2), 183~192.
- 30 Neue, H-U., and R. L. Sass, The Budget of Methane from Rice Fields, IGACActivities Newsletter, 1998, **12**, 3~11.
- 31 Wang Mingxing, and Li Jing, CH_4 emission and oxidation in Chinese rice paddies, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64**, 43~55.
- 32 王跃思、郑循华、王明星, 气相色谱法检测大气中的 N_2O 浓度, 分析测试技术与仪器, 1994, **94** (2), 19~24.

- 33 Davidson E. A. , Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 1992, **56**, 95~102.
- 34 Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi et al. , Characters of greenhouse gas (N_2O , NO , CH_4) emissions from croplands of Southeast China, *World Resource Review*, 1999, **11** (2), 229~246.
- 35 黄耀、焦燕、宗良纲等, 土壤理化特性对麦田 N_2O 排放影响的研究, 环境科学学报, 2002, **22** (5), 598~602.
- 36 Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi et al. , Impacts of Soil Moisture on Nitrous Oxide Emission from Croplands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China, *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**, 207~224.
- 37 Ding Aiju, and Wang Mingxing, Model for methane emission from rice fields and its application in Southern China, *Adv. Atmos. Sci.* , 1996, **13**, 159~168.
- 38 Li Jing, Wang Mingxing, Huang Yao et al. , New estimates of methane emission from Chinese rice paddies, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64**, 33~42.
- 39 Gou Ji, Zheng Xunhua, and Wang Mingxing, Modeling N_2O emission from agricultural fields in Southeast China, *Adv. Atmos. Sci.* , 1999, **16** (4), 581~592.

Advance of Researches on Greenhouse Gases Emission from Chinese Agricultural Ecosystem

Li Jing, Wang Mingxing, Wang Yuesi, Huang Yao, Zheng Xunhua, and Xu Xin
(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract Since 1985, the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences has carried out systematically field observation experiments with self-designed automatic observation system for 16 years continuously on regularities of methane emission as well as their relationship to soil texture, meteorological factors and agriculture managements in the paddy field of China's four major rice culture regions. We have devoted to studies of production, oxidation and transportation of methane emission from rice fields. We have explored several practical steps for mitigating methane emissions from rice paddies, and developed numerical. A series of new rules in the temporal/spatial variations and investigations on transformation rate of methane emission were founded. Some new opinions about production and emission rates of methane from paddy field and their relations of environmental conditions have been formed. Based on ample evidences, the international estimates on total methane emission from China's and global paddies have been changed. In the light of a hard study of CH_4 , we have also conducted investigations on nitrous oxide (N_2O) emissions form cropland since 1993, and acquired a batch of new achievements in the domain of production theory and experimental study concerning temporal/spatial variations and environmental factors governing N_2O emissions from farmland, especially the relations of efflux to soil humidity and temperature, the interactions of fertilizer with emission fluxes, CH_4 emission with N_2O emission fluxes, as well as their theoretical and experimental study on measures to reduce emissions. We review the research works of 16 years, summarize achievements, and offer further prospects of research on greenhouse gases emissions, especially carbon dioxide (CO_2), from terrestrial ecosystem.

Key words: terrestrial ecosystem, methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O), emission rate, carbon dioxide (CO_2)