

稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理

王明星 李 晶 郑循华

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 通过对中国五大水稻产区稻田甲烷排放的多年观测实验, 描述了稻田甲烷排放的时空变化规律及特征并分析研究了其形成机理。稻田甲烷排放的日变化有四种类型, 甲烷的传输效率是日变化形成的主要因素。稻田甲烷土壤中排放率的季节变化型式在不同的地区是不同的, 这取决于气温变化、水稻品种、施肥及水管理等不同因素。甲烷产生主要发生在稻田土壤耕作还原层 (2~20 cm), 氧化主要发生在水土交界面的氧化层和根部氧化膜, 并受多种因子的影响。土壤中的甲烷通过三个路径向大气排放, 不同时期三个路径在甲烷传输中的相对重要性不同。施用化肥和沼渣肥可以降低土壤中甲烷的产生和排放, 而有机肥会增加土壤中甲烷的产生和排放。中国的稻田每年向大气中排放 9.67~12.66 百万吨甲烷, 全球稻田甲烷的总排放量约为 35~56 Tg/a。

关键词 甲烷排放 日变化 季节变化 氧化和传输 影响因子

1 引言

大气中的甲烷以每年约 0.8% 的速度增长, 由于甲烷的强温室效应和化学活性, 研究全球甲烷的循环具有重要的意义。稻田是最重要的大气甲烷的人为源之一^[1], 对这一重要源的研究可以提高全球甲烷排放量估算的精确程度。中国是重要的水稻生产国, 水稻种植面积约占世界稻田总面积的 22%, 产量约占世界水稻产量的 38%。从目前开展的观测看, 中国稻田不仅是中国最主要的 CH₄ 排放源, 而且对全球大气的 CH₄ 排放也起着重要的作用。根据生态气候带、地貌特征以及耕作制度, 我国水稻田大致可分五大区: 华南滇南水稻区、华中水稻区、长江中下游水稻区、西南水稻区和北方水稻区。气候土壤状况以及植物生长体系在这五大区有很大的差别。因此获取这五大典型水稻种植区的长期的稻田甲烷排放数据是必要的。从甲烷种植面积省级的统计数据来看, 90% 以上的水稻种植在中国南部, 只有 7% 左右的水稻种植在北方水稻区。从 1987 年以来我们应用静态箱技术在中国的五大水稻区进行了观测。除了甲烷排放通量的观测, 还进行了甲烷排放机理的研究, 以及温度、水管理、施肥对甲烷排放的影响等。本文总结了 10 年来的研究成果和一些甲烷排放机理方面的新发现。

2 稻田甲烷排放特征

2.1 日变化

只有通过间隔时间很短的连续观测才能对甲烷排放率的日变化做出正确的描述。我

们通过多年中国稻田甲烷排放的连续观测, 发现了四种不同类型的日变化规律(图 1)。

第一种也是最主要的一种是下午最大值型, 这种日变化在浙江、四川、湖南、江苏都曾观测到^[2], 并且和水温、土壤浅层及空气温度的日变化一致。过去的文献说明, 甲烷排放的日变化与甲烷在稻田土壤里的产生率有关^[3]。根据我们的实验观测可以得到不同的结论: (1) 甲烷在土壤里的产生率并没有明显的日变化规律; (2) 在空气温度变化和水及土壤温度变化之间有一段延迟; (3) 实验室模拟实验证明, 土壤温度的确可以影响甲烷的产生率, 但是这两者变化之间有 10~11 小时的时间延迟; (4) 稻田甲烷排放的日变化与空气温度和稻田水的温度有很好的相关, 但与深层土壤温度不相关。因此我们得出结论, 控制短期甲烷排放变化的主要因子不是甲烷在土壤里的产生率, 而是甲烷向大气中传输的效率。

第二种是夜间至凌晨出现排放最大值, 这是比较少见的一种, 只在浙江省夏季观测到, 我们认为是植物体在炎热夏季的中午为防止植物体内的水分散失而关闭气孔, 堵塞了甲烷向大气传输的主要途径, 未能排出的甲烷在晚上随着气孔的开启排向大气, 从而出现了甲烷排放率在夜间的极大值^[4]。但在湖南地区, 夏天的炎热程度不亚于杭州, 却始终没有测量到这种夜间极大值型式。

第三种型式是一日内下午和晚上出现两次最大值, 这种情况在杭州地区的晚稻和第二种型式一起常被发现, 可能是以上两种情况排放路径的作用结合在一起造成的。当关闭气孔而使植物体排放能力下降时, 甲烷可以通过其他的路径排放出来(如气泡), 第二种型式还是第三种型式取决于植物体和气泡排放的相对大小。

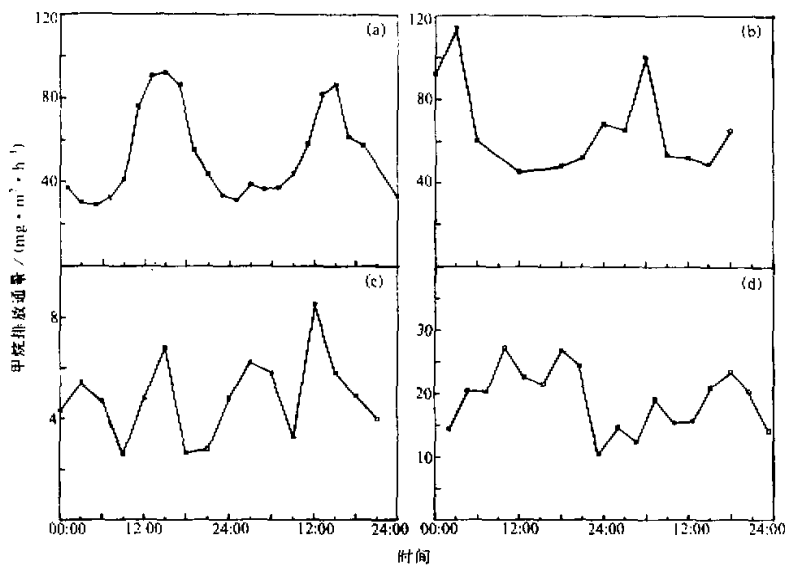


图 1 稻田甲烷排放的日变化的四种不同型式
(a) 下午峰型, (b) 夜间峰型, (c) 下午夜间双峰型, (d) 无规律型

第四种变化型式是在特殊天气条件下发生的。在阴雨天气,冷空气过境时,会使甲烷的排放毫无规律。

2.2 季节变化

日平均甲烷排放率在水稻生长期波动较大,其变化型式在不同地区是不同的,这取决于水稻种植系统类型(例如早稻和晚稻)、稻田的预处理方式(例如施绿肥、前茬种小麦、套作、泡田等)、土壤特性、天气状况、水管理、水稻品种、施肥情况等。日平均甲烷排放率在短周期波动中出现显著的排放峰值(图2)。江苏单季稻分蘖期和生长期有两个显著的峰值,但是峰值的相对高度和出现的确切时间有一定的波动。这种情况可能是由于水稻种植前土地的不同处理,淹水程度和天气状况决定的。除了单季稻要经过最热的时期(7月和8月)而早稻没有(只到7月)之外,早稻和单季稻生长期的天气变化趋势是相似的。在江苏和湖南的单季稻发现甲烷排放率在水稻生长期有三个峰值,但强度和时间有所不同。第一个峰值出现在水稻生长的初期,可能是因为刚淹水后土壤中的有机物质发酵剧烈,导致土壤中较多的甲烷产生而造成的。第二个和第三个峰值分别出现在分蘖开花期和成熟期,这与根的渗出物和根系物质的腐败有关。甲烷产生和植物体传输能力有季节变化,因此我们应该考虑大气—水稻—土壤之间的传输效率。这体现在第二个峰值的产生上,此时空气温度和植物体生长都适于甲烷传输。

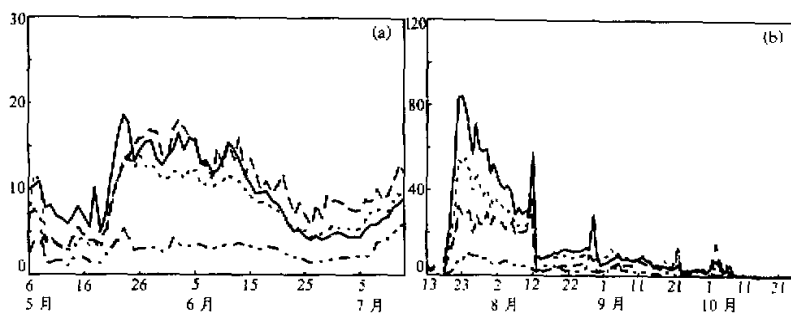


图2 稻田甲烷排放的季节变化

(a) 早稻的季节变化与施肥影响, (b) 晚稻的季节变化与施肥影响

·····: 常规肥, ———: 有机肥, - · - · - ·: 化肥, ---: 沼液肥

对晚稻甲烷排放率季节变化的研究揭示了一些以前未被注意的现象。晚稻的季节变化在浙江和湖南两省很相似,甲烷的排放在水稻移植后的几天达到最大值,随着水稻的生长,排放率逐渐降低。这一相对简单的变化型式与影响甲烷产生和排放的参数有关,第一,空气温度在7月末达到最高,当水稻开始生长时,淹水的土壤中有丰富的有机质,使甲烷有较高的产生率,这已在甲烷产生的实验中观测到。第二,水稻植物体还太小,在甲烷传输到大气的过程中不能起到重要作用,主要的传输途径是气泡,这个时期气泡在稻田中随处可见。通过计算甲烷排放量和产生量的比率,晚稻生长期中这个时期的传输效率最高。由此可知气泡是防止甲烷氧化的最佳输送途径。甲烷产生率和传输效率在水稻生长的初期都具有最大值,因此产生了甲烷排放率的最大值。甲烷产生率和传输效率都随着时间的推移在减小,导致了这种相对简单的甲烷排放率的季节变化。值得

注意的是水稻体对甲烷传输的作用不像以前文献中提出的那么重要, 例如在水稻生长初期小于 15% 的甲烷通过植物体传输。

2.3 年际变化和空间变化

在浙江、江苏、湖南等省能够观察到比较明显的甲烷平均排放率的年际差异^[2]。水稻品种的差异和气候条件(主要是温度)的变化不能引起如此巨大的年际差异。由于我们对单个影响因子如气候变化、水稻品种、土壤状况、水肥管理等了解远远不够, 不同地区年际变化的原因还不明确。这种年际变化有可能反映了与甲烷产生、输送、氧化有关的整个生态系统的年际波动。

中国不同地区稻田甲烷的排放有很明显的空间差异, 土壤类型与土壤特性、气候系统、水稻品种与生长体系、施肥效应、水管理等是造成这种差异的原因, 其中土壤类型和土壤理化特征是最重要的。

3 稻田甲烷排放机理研究

近十多年来世界各地稻田甲烷排放的测量结果表明, 稻田甲烷排放存在较大的时空变化, 即在各不同地点稻田甲烷排放率有很大的差别(美国、欧洲、中国、日本、印度等)。同一地点也观测到日变化、季节变化、年际变化。稻田甲烷排放的时空变化是全球范围内稻田土壤类型和土壤特性、水稻品种、种植管理方法、温度及灌溉方式等许多因素复杂影响的结果。我们是不可能对全球各种条件下的所有稻田进行长期连续测量的, 因此为了估算全球稻田甲烷排放总量, 一种更可靠经济的方法是通过稻田甲烷排放机理的理论和实验研究, 同时结合影响因素的研究, 建立数学模型, 然后输入全球稻田甲烷排放的这些影响因素的统计资料及变化趋势, 就可以更好地估算和预测全球稻田甲烷的排放量。

3.1 稻田甲烷的产生

稻田甲烷的排放是土壤甲烷产生、再氧化及排放传输三个过程相互作用的结果。甲烷的产生是这个体系中的第一步也是极关键的过程, 其数量的大小会直接影响排放通量的大小。稻田中甲烷的产生主要是 CO_2/H_2 及乙酸 (CH_3COO^-) 这两种基质在厌氧状态下 ($E_h \leq -300 \text{ mV}$) 被产甲烷菌利用还原而生成的^[5]:



但是在不同稻田土壤中, 这两种基质对甲烷产生的贡献并不固定, 这主要取决于各不同稻田土壤中微生物菌族的差异, 有些甲烷菌喜欢乙酸盐而有些更偏爱 CO_2 和 CH_4 。另外分解复杂有机物质的菌族的不同以及土壤中有有机物种类不同也会引起 CO_2/H_2 以及乙酸盐来源及含量差异。

通过对意大利稻田及我国湖南地区稻田土壤中甲烷产生率的实地测量, 发现甲烷产生主要发生在稻田土壤耕作还原层 (2~20 cm)^[6], 但不同的农田作业对此有很大的影响。在意大利稻田中 7~17 cm 土壤层是重要的甲烷产生区域, 13 cm 处的甲烷产生率最大。由于我国湖南地区独特的有机肥铺施操作, 土壤中甲烷的产生在耕作层氧化层以

下 3~7 cm 就到达最大值。土壤湿度能影响土壤主要甲烷生产区域的深度,当土壤湿润度低于某一临界值后,主要的甲烷产生区域将向土壤深处移动,甲烷产量也明显减少。种植水稻的稻田土壤中甲烷产生率要比不种水稻农田的产生率大,同块稻田中甲烷产生率也有一定的空间变化。另外水稻植物根部土壤比水稻行间土壤能产生更多的甲烷。在大多数情况下甲烷的产生率下午大于上午,但在一日间没有明显的日变化规律,因此甲烷排放路径的日变化可能是甲烷排放日变化的主要原因。在湖南地区,不同的施肥和水管理对稻田的甲烷产生率差别十分显著。这种差别在甲烷排放率的差异上也能体现出来。总有机酸含量差别在不同施肥田中较小,但在不同水管理的田中差别较大。实验室培养发现土壤温度对土壤甲烷产生率的影响很大,温度每上升 10°C,甲烷产生率能增加 3 倍多。在整个水稻生长季节中,仅施肥或不施肥的意大利稻田土壤中甲烷产生率在水稻移栽后逐渐增大,并在 8 月底水稻收割前达到最大。湖南仅施肥的稻田甲烷产生率的季节变化与意大利稻田相似,而施有机肥的稻田无论早稻还是晚稻,土壤中甲烷产生率在水稻生长初期及末期均出现最大值。在整个水稻生长季节中,土壤中产生的甲烷仅有 28% (意大利) 和 16% (我国湖南地区) 被排向大气,而其余大部分被氧化在土壤中^[6]。

3.2 稻田甲烷的氧化

氧化在稻田甲烷的排放过程中起着重要的作用。观测表明,甲烷排放量占甲烷产生量的 3%~81%^[3,6,7],剩余的部分在输入大气前被氧化。甲烷可以在有氧和厌氧环境下被氧化,甲烷的厌氧氧化过程还不太清楚,但在一定的厌氧环境中,氧化也可能是甲烷的汇。有氧氧化已经被很好的研究,有文献报道甲烷氧化非常严格地与氧气的存在相伴,表明无氧氧化不重要。在预培养的水稻土中,氧气的混合比高于 1%~3% 时,甲烷的氧化对氧气混合比的变化不敏感,而氧气的混合比低于 1%~3% 时,甲烷的氧化率迅速下降并接近于零。

在水稻土中,分子氧在淹水后很快被消耗,空气中的氧气通过呼吸作用经通气组织到达植物的根部。在淹水稻田中只在水土交界面薄薄的氧化层土壤中和植物体的根部氧化膜存在氧气,因此在淹水稻田中甲烷的氧化只能发生在土壤表层的有氧层和根围氧化膜。当稻田排水晒田时,由于氧气的存在甲烷的氧化作用非常强。甲烷在土壤中的氧化是受土壤中的微生物控制的。甲烷的氧化被甲烷好氧氧化菌所催化。甲烷氧化菌有两种类型,一种在甲烷混合比高的情况下氧化甲烷;另一种在甲烷低混合比的情况下氧化甲烷。甲烷氧化活动与甲烷氧化细菌的数量只有在甲烷高混合比 (体积分数为 100×10^{-6}) 的情况下有相关性,而在甲烷体积分数 $< 2 \times 10^{-6}$ 时无相关性^[8]。

根部氧化膜中甲烷氧化菌的含量是大块土壤中的 10 倍,比土表氧化层多 $1/3$ ^[9]。在不同土壤中甲烷的培养实验表明,甲烷氧化的能力受土壤深度的影响,甲烷氧化在 0~1 cm 的土壤层最大,在更深的土壤层有几个次最大量,因为在还原性的土壤中存在氧化性的部分。甲烷的氧化可以被气体乙炔完全抑制,当甲烷的氧化被存在于水土交界面中的乙炔抑制的时候甲烷的排放有明显的增加,但当乙炔存在于根系氧化膜时这种影响很小。因此要了解在根系氧化膜处对甲烷氧化的重要程度还需要更多的培养实验及观测。

许多因子影响甲烷的氧化,如土壤渗透率、土壤湿度和温度等。甲烷的氧化消耗与

土壤渗透性有极大的关系, 土壤渗透率由土壤的结构特性、土壤温度、有机质含量等决定。从实验室的培养实验发现, 在温带地区甲烷的氧化受土壤湿度的影响。草地土壤中, 甲烷氧化率的最大值在不同湿度及土壤类型中从 18%~33% 不等, 灌木土壤中从 30%~51% 不等。晒田阶段后, 降雨可以提高甲烷在干燥土壤中的吸收, 这表明土壤的湿度可以影响甲烷的氧化。适宜的土壤湿度可以增加土壤中的微生物量, 但土壤湿度对甲烷氧化的最佳值在不同的土壤中有很大的差别。这是由于土壤中水与有机质的作用造成的, 与土壤的密度、微孔的数量和有机质的含量有很大关系, 这些因子会影响到甲烷运输到甲烷氧化区的量。温度在一定条件下显著影响甲烷氧化率, 在 5~36°C 的范围内甲烷氧化率随温度上升而增加, 因为在这种情况下甲烷氧化酶的活性成为氧化率的控制因子。不同的土壤中, 甲烷氧化的最佳温度在 31~38°C 之间。

稻田甲烷氧化率的观测实验很少。日本的稻田实验结果表明, 氧化率最大值在土壤表层 (0~1 cm), 深层土壤比表层土少约 58%^[10]。稻秸的使用对甲烷的氧化率没有明显的影响。氧气一般仅存在于几毫米到 1 厘米之间的水土交界层中, 但是犁地会破坏甲烷氧化活动的垂直剖面, 对自然土壤剖面的干扰可能影响甲烷向大气中的排放量, 这可以部分解释农田的甲烷沉降率比自然土地低。

甲烷的氧化作用可以解释在一些稻田中极低的甲烷排放量和在一些地区观测到的灌溉稻田收获之前的甲烷排放量的减少。原因是干燥的土壤中, 从空气中扩散到土壤的氧气可能氧化所有传输过程中的甲烷。从腐败的有机质中释放或从大气中输入土壤的 NH_4^+ 可以抑制甲烷的氧化作用^[11]。野外及实验室的实验结果证明了施肥可以抑制土壤中甲烷的氧化。

3.3 稻田甲烷的传输

只有当土壤中甲烷积累到一定的数量, 在土壤及传输中被较少地氧化, 而又有较通畅的排放途径时, 才会出现较大的排放量。甲烷向大气传输途径的畅通能够使土壤中的甲烷很快排向大气, 避免在氧化区域长时间停留, 因此甲烷传输效率是影响甲烷排放率的重要因素。土壤中的甲烷通过三个路径向大气排放, 即水稻植物体内部的通气组织、冒气泡、水中液相扩散 (图 3)。在水稻生长的大多数阶段, 大部分甲烷是通过水稻植物体排到大气中去的。由于水稻植物体内部通气组织较发达, 茂密的水稻根系组织分布在稻田土壤中, 能主动汲取溶有甲烷的土壤水, 使甲烷进入通气组织。另一方面, 水稻植物体也能传输大气中的氧气到根系, 以维持根系组织的呼吸, 它能很大程度地影响根部区域甲烷的氧化。水稻体还能通过根流出物质影响土壤中甲烷的产生率, 由此可见水稻体对甲烷排放的重要性。在水稻的不同生长阶段, 水稻植物体和气泡对甲烷排放的相对重要性是不一样的, 甲烷在水中的液相扩散对甲烷排放的贡献极小。在我国及意大利稻田都发现稻田甲烷排放率的日变化很明显, 稻田甲烷产生率的日变化无法说明以上规律, 因此对甲烷传输的三个过程特别是水稻植物体甲烷传输能力及其在一日间和水稻生长季节中的变化进行研究是十分必要的。

通过对稻田甲烷排放、土壤甲烷产生率以及植物体甲烷传输、气泡、液相扩散这三种排放途径的同时测量后发现: 甲烷氧化作用在下午甲烷排放路径通畅时较小; 阴雨天气造成甲烷排放率降低会增加甲烷在土壤中的氧化量。早稻甲烷传输效率在 6 月上、中旬较高, 晚稻则在水稻生长初期的 7 月下旬最高, 这主要是两季水稻的生长季节中气候

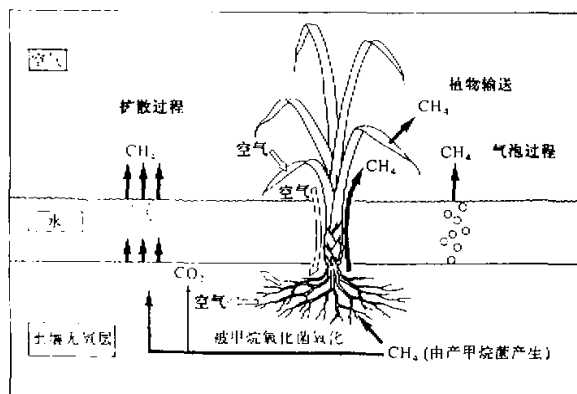


图3 水稻甲烷的排放路径

因子的差异造成的。只有在较短的时间尺度内,当水稻植物体、气候因素维持相对恒定时,甲烷产生率和稻田甲烷的排放才显出正相关。

水稻植物体内有明显的甲烷浓度梯度。水稻的切割控制实验发现,通过植物体排放甲烷的比例随季节而变化,在进行单株植物体排放测量时发现了同样的结果。早稻和晚稻甲烷通过水稻植物体的传输分别占甲烷总体排放的 73.18% (43.07%~97.88%) 及 54.98% (11%~99.95%)^[12]。植物体对甲烷排放的作用早稻大于晚稻,水稻植物体排放甲烷的能力的季节变化早、晚稻相类似,即在移栽后,水稻植物体甲烷排放能力随着水稻的生长不断增强,到水稻抽穗中期达到最大,以后则随水稻的成熟而变小。在生长期水稻植物体排放甲烷的能力与株高之间存在极大的线形正相关。土壤中甲烷浓度远远大于大气中的甲烷含量 (10~104 倍),根部区域土壤甲烷浓度小于水稻行间土壤中的,在垂直方向上甲烷浓度在 14 cm 深的土壤中最大,与土壤浅层有明显的差别,甲烷排放率与根部区域甲烷浓度有很好的相关性。早稻、晚稻通过气泡的甲烷排放量分别占总数的 24.14% 及 40.52%。在不种水稻的田中气泡排放要明显大于种有水稻的,水稻田覆盖水中明确存在向上递减的甲烷浓度梯度,早稻和晚稻甲烷通过液相扩散方式排放的甲烷分别只占甲烷排放总量的 2.68% 和 4.50%。

3.4 影响稻田甲烷排放的因子

甲烷在大气中的驻留期较短 (约 10 年),甲烷排放的控制作用要比其他寿命更长的温室气体的控制更快地从大气浓度上反映出来。因此,控制稻田甲烷排放对气候变化对策有更重大的现实意义。只有了解各种复杂因子对稻田甲烷排放的影响,才能制定出稻田甲烷排放的控制措施,减少稻田甲烷的排放对大气甲烷浓度的影响。

3.4.1 土壤特性

中国水稻田有不同的水稻土。传统的五大水稻种植区是根据土壤类型、地理形态、气候系统及水稻生长系统划分的。浙江、湖南、四川省的土壤分别是河口过渡母质的土壤、红土母质的土壤和紫色土壤。不同地区的土壤有不同的物理化学和生物学特性,这主要包括土壤质地、渗透率、动态水的含量、保水能力、有机物质的含量等。所有这些

都影响甲烷的产生、氧化和传输。在研究甲烷产生与排放的过程中, 应该考虑更多的土壤物理、化学方面的参数。从中国观测的结果来看, 土壤中的有机碳与甲烷排放量的关系并不密切。四川稻田的有机质含量几乎是所有观测点中最低的, 但是甲烷的排放量很大。在北京有机质含量为 1.33% 的稻麦轮作田比含有机物 3.23% 只种植水稻的田甲烷排放率高。这说明甲烷排放率还受到有关甲烷氧化和传输的土壤其他性质的影响。湖南土壤的渗透率很大 (10 mm/h), 但在四川稻田里的水却可以更好地保持, 北京土壤的渗透率在单季稻田比稻麦轮作的田中大, 这也许可以解释两者排放率的差异。因此, 甲烷产生氧化和传输的能力在中国不同的土壤类型会有很大的差别。

3.4.2 植物体的生长活动

水稻植物体的生长活动与甲烷产生、氧化、传输都有很大的关系。水稻植物体有很强的传输能力, 这主要取决于稻株的大小和生长活动, 甲烷主要通过植物体的通气组织和分子间的空隙传输到大气中。水稻体还能够提供给土壤有机碳, 尤其在生殖期和成熟期。根系提供给土壤的有机碳可能是甲烷排放第二个和第三个峰形成的原因。不同水稻品种对甲烷排放的影响已经被观察到。1988~1991 年四川省的实验观察到种植的杂交稻比常规稻的甲烷排放率低^[13]。甲烷的排放与地表生物量也有很大的关系。甲烷产生率的空间变化与根系的空间分布有关, 一般高的水稻产量有高的甲烷排放, 因为水稻体和根系提供了良好的传输途径, 根的生长为甲烷产生提供了碳源。土壤温度与甲烷排放日变化的关系也与水稻的生长活动有关, 在植物生长初期两者的相关性比较大。将稻田水面上的叶子剪掉并不影响甲烷排放的日变化规律, 这说明甲烷排放的日变化不是由水稻体的新陈代谢决定的。

3.4.3 气候系统

当地的气候系统也是一个很重要的影响稻田甲烷排放的因子。在同一土壤类型中, 温度、辐射量和降雨量是控制甲烷排放的主要气候因子, 温度, 尤其是土壤温度在甲烷产生与排放中起着非常重要的作用。在双季稻地区, 其他因子稳定的情况下, 晚稻甲烷的排放通量比早稻的大, 这可能是由于两者生长期不同的天气变化趋势造成的。对晚稻来说, 空气温度在其生长的初期达到最大值, 然后随着水稻的生长温度逐渐下降, 这个变化趋势与晚稻甲烷排放通量的变化趋势相符。下午的甲烷排放率一般比上午大, 可以看出一定条件下温度是造成这一差异的重要原因。意大利稻田甲烷排放的研究说明, 土壤温度影响甲烷排放通量, 当温度从 20°C 增加到 35°C 时, 甲烷排放量增加了一倍, 在中国 5 cm 深的土壤温度从 18°C 上升到 31°C 时, 稻田甲烷排放量增加很快。在印度, 甲烷排放随着土壤温度的上升甲烷排放上升, 但高于 35°C 时甲烷排放量反而下降。但在相似气候变化趋势的地点, 温度变化量不能解释甲烷排放的年际和空间的变化, 例如, 浙江、湖南和四川的平均温度分别为 16.1、16.5 和 17.1°C, 如此小的温度差别不能解释三地甲烷排放通量的差别。因此还有其他的因子与气候因子共同作用。另外, 辐射量可以影响大气温度和植株的生长, 对水稻的产量有很大的关系, 与甲烷的排放是间接的关系。降雨量对甲烷的排放有重要的作用, 尤其是在雨水灌溉的稻田中。

3.4.4 施肥措施

在中国不同的地区就施肥对甲烷排放率的影响进行了研究 (表 1)。几乎所有的研究都证明有机肥对甲烷排放有促进作用, 但化肥的影响还不确定。当增加有机肥时, 甲

表 1 不同施肥对稻田甲烷排放率的影响

地点		施肥管理	甲烷排放率 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	比较	引用文献
浙江 1987~1989		不施肥	30.4	100%	文献[15]
		化肥 ¹	27.5	90%	
		有机肥 ²	35.1	115%	
		化肥+有机肥 ³	28.3	93%	
湖南	1991	化肥+有机肥 ⁴	38.3	100%	文献[16]
		有机肥 ⁵	47.4	124%	
		化肥 ⁶	10.4	27%	
		沼渣肥 ⁷	19.2	50%	
	1992	化肥+有机肥 ⁴	11.4	100%	文献[12]
		有机肥 ⁵	14.6	128%	
		化肥 ⁶	3.1	27%	
		沼渣肥 ⁷	9.8	86%	
江苏		化肥+有机肥 ⁹	10.8	—	文献[13]
		化肥 ¹⁰	2.6	—	
北京	1990	NH_4HCO_3 +有机肥 ¹¹	35.9	100%	文献[13]
		NH_4HCO_3 +有机肥 ¹²	48.9	136%	
		NH_4HCO_3 ¹³	17.5	49%	
	1992	有机肥 ¹⁴	23.9	—	
		$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ¹⁵	15.8	—	
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ¹⁶	9.6	—	
		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ¹⁷	9.4	—	
		$(\text{NH}_4)\text{HCO}_3$ ¹⁸	15.0	—	
四川 1992		化肥+有机肥 ¹⁹	86.2	100%	文献[13]
		化肥+沼渣肥 ²⁰	45.3	53%	

施肥管理中的上角标分别为如下的每公顷肥料施用量:

- | | |
|--|---|
| 1 早稻: 694 kg KCl | 9 15 t 动物粪便, 188 kg 尿素 |
| 晚稻: 694 kg K_2SO_4 | 10 600 kg $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ |
| 2 1024 kg 动物粪便 | 11 3.75 t 马粪, 37.5 kg $(\text{NH}_4)_2\text{HCO}_3$ |
| 3 1 与 2 结合 | 12 7.5 t 马粪, 37.5 kg $(\text{NH}_4)_2\text{HCO}_3$ |
| 4 早稻: 15 t 绿肥, 38 kg KCl 300 kg 复合肥 | 13 75 kg $(\text{NH}_4)_2\text{HCO}_3$ |
| 晚稻: 3 t 稻秆, 150 kg 尿素, 375 kg 复合肥 | 14 2.7 t 马粪, 表层土 |
| 5 早稻: 15 t 绿肥, 15 t 动物粪便 | 15 144 kg $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ |
| 晚稻: 3 t 稻秆, 22.5 t 动物粪便 | 16 144 kg $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ |
| 6 早稻: 150 kg 尿素, 60 kg KCl, 450 kg 复合肥 | 17 117 kg $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ |
| 7 早稻: 45 t 沼渣肥 | 18 225 kg $(\text{NH}_4)_2\text{HCO}_3$ |
| 晚稻: 45 t 沼渣肥 | 19 28.5 t 普通有机粪便 |
| 8 1991 干燥一星期的沼渣肥 | 20 30 t 沼渣肥 |
| 1992 干燥一天的沼渣肥 | |

烷排放通量增加, 施用有机肥的田中甲烷的产生率也高。经过沼气池发酵以后的沼渣肥能够有效地减少甲烷的产生和排放, 因为有机碳在沼气池中被部分或全部分解了。在沼气池中发酵的时间与施用前的预处理不同可以不同程度地减少甲烷的排放。发酵后的肥料在空气中干燥一个星期后再用可以减少甲烷排放约 50%, 而干燥一天后即用以则只能减少 14%。中国有许多小型的沼气池, 它们可以给农民带来很多益处, 因此沼渣肥在中国很有发展前景。

3.4.5 水管理

除了水稻土的渗透率，稻田的水管理很大程度上影响着甲烷的排放（表 2）。在湖南缺水时可以观察到甲烷产生与排放的减少，甲烷产生层随着土壤湿度的降低从土壤表层逐渐向深层转移。当稻田重新浇灌后，甲烷的排在很长时间内不能恢复。而在华中地区，在晚稻收获前通常要将稻田中的水排掉，以便播种绿肥或其他冬季旱作，甲烷的排放量在此阶段很快地下降，可以影响总的和季节平均的甲烷排放通量。在一些地区科学的间歇晒田被证明是一种很好的减排措施，苏州的观测实验表明按当地常规方式进行间歇晒田可以减少甲烷排放约 26%。四川和江苏的实验都证明垄作可以减少甲烷排放。间歇晒田、垄作等方法减少甲烷排放的有前景的实用措施。

表 2 不同水管理对稻田甲烷排放的影响

地点		水管理	甲烷排放率 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	比较	引用文献
湖南 1992	早稻	常湿润	3.1	53%	文献[12], [18]
		间歇灌溉 (3 d)	5.4	92%	
		常规水深 (3 cm)	5.9	100%	
		深灌 (10 cm)	3.0	51%	
	晚稻	常湿润	5.5	45%	
		间歇灌溉 (3 d)	13.6	111%	
		常规水深 (3 cm)	12.2	100%	
		深灌 (10 cm)	15.8	130%	
江苏	1990	常规水深	10.8	100%	文献[17]
		垄作	6.6	61%	
	1992	常规水深	19.8	100%	
		垄作	12.6	64%	
北京	1990	常规水深	48.9	100%	文献[17]
		间歇灌溉	14.6	30%	
	1991	1. 常规水深	20.4	100%	
		间歇灌溉	18.0	88%	
		2. 常规水深	10.0	100%	
		间歇灌溉	8.7	87%	
		旱田耕作	2.6	26%	
	1992	常规水深	23.9	100%	
		间歇灌溉	15.8	66%	
		1. 常规水深	8.5	100%	
		间歇灌溉	3.6	42%	
		旱田耕作	2.2	26%	
四川 1992		常规水深	86.2	100%	文献[13]
		垄作	44.7	52%	

4 稻田甲烷排放总量的估算

根据稻田甲烷排放多年的监测数据和研究结果，总结稻田甲烷排放的基本规律，以及控制甲烷产生、传输及排放过程的主要因子，已经建立起稻田甲烷排放的初级模式^[14]。模式体现了实际天气条件及某些田间管理对水稻生长和甲烷排放的影响。模式

主要包括水稻的生长、土壤有机物的分解和甲烷产生、传输及排放三个部分。只要输入与天气、土壤（有机物含量和酸度）和施肥（施肥类型和施肥量）有关的参数，模式将迅速而且较准确地计算出各地区稻田甲烷排放因子，进而计算出各地区稻田甲烷排放量并进而计算出稻田甲烷排放总量（表 3）。根据农业统计年鉴上省级稻田种植的统计数据及有关气象、耕作情况，我们估算中国稻田甲烷的排放总量约为 9.67~12.66 Tg/a。根据中国和印度的观测资料推算，全球稻田甲烷排放总量在 35~56 Tg/a 之间。

表 3 中国稻田甲烷排放总量估算

省份	播种面积 (10^3 ha)	早稻和单季稻		晚稻		单季晚稻，冬水田 和麦茬稻		区域排放量 (Tg/a)
		甲烷排放率 ($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)	甲烷排放量 (10^8 g/a)	甲烷排放率 ($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)	甲烷排放量 (10^8 g/a)	甲烷排放率 ($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)	甲烷排放量 (10^8 g/a)	
北 京	34.3	0.126	39~48					0.004~0.005
天 津	45.4	0.108	44~54					0.004~0.005
河 北	147.7	0.146	194~237					0.019~0.024
山 西	9.2	0.063	5~6					0.000~0.000
内 蒙 古	79.1	0.085	61~74					0.006~0.007
辽 宁	543.3	0.088	430~526					0.043~0.053
吉 林	418.4	0.053	200~244					0.020~0.024
黑龙江	673.5	0.079	479~585					0.048~0.059
上 海	253.4	0.146	8~10	0.275	17~21	0.513	977~1343	0.100~0.137
江 苏	2454.5	0.189	17~22	0.276	29~36	0.510	9908~13623	1.000~1.368
浙 江	2383.5	0.169	1235~1588	0.345	2882~3602	0.552	1303~1792	0.542~0.698
安 徽	2312.3	0.197	768~987	0.276	1228~1537	0.488	4679~6434	0.667~0.900
福 建	1511.9	0.091	386~497	0.526	2553~3191	0.414	989~1360	0.393~0.505
江 西	3292.6	0.182	1992~2562	0.458	5731~7164	0.623	818~1125	0.857~1.085
山 东	124.2	0.200	224~273					0.022~0.027
河 南	439.5	0.170	672~822					0.067~0.082
湖 北	2636.5	0.206	1114~1432	0.390	2409~3012	0.554	5283~7265	0.881~1.171
湖 南	4370.4	0.173	2233~2871	0.341	5031~6288	0.536	2925~4022	1.019~1.318
广 东	3175.9	0.177	1903~2447	0.516	6341~7926	0.543	450~619	0.869~1.099
广 西	2543.7	0.146	1216~1564	0.491	4676~5844	0.455	594~817	0.649~0.823
海 口	414.3	0.158	206~265	0.494	736~920	0.498	167~229	0.111~0.141
四 川	3123.8	0.077	23~30	0.185	64~80	1.352 0.245	17338~23840 3513~4216	2.094~2.817
贵 州	741.2	0.060	0.4~0.5	0.210	1.7~2	0.210	1552~1863	0.156~0.187
云 南	1026.1	0.028	10~13	0.076	31~39	0.069	637~764	0.068~0.082
西 藏	0.8	0.065	0.5~0.6					0.000~0.00
陕 西	159.5	0.119	171~209					0.017~0.021
甘 肃	5.13	0.065	3~4					0.003~0.004
青 海	-							
宁 夏	60.5	0.070	38~47					0.004~0.005
新 疆	79.9	0.100	72~88					0.007~0.009
总 计	33062.5							9.67~12.66

5 总结

甲烷是由产甲烷菌在严格的还原条件下产生的, 水稻体增加了甲烷向大气中的排放。不同的土壤特性土壤湿度、水管理、施肥方式及水稻体的生长活动控制了稻田甲烷排放的日变化和季节变化规律。日变化主要被温度及水稻体的生长控制, 有四种变化类型。季节变化是由水稻生长、温度变化、水肥管理等复杂因子影响的。土壤中的甲烷可以通过三个途径传入大气, 即水稻体、土壤水表面的扩散、气泡。水稻体是最主要的传输途径, 它受到植物新陈代谢的控制, 69%~90%的甲烷在传输入大气之前被氧化, 氧化主要发生在水土交界面及根部氧化膜。水稻土的培养实验说明氧气混合比、土壤湿度、温度影响甲烷氧化率, 根部氧化膜中甲烷氧化的重要性还不清楚, 还需进行实验研究和直接观测才能改进甲烷产生、氧化传输排放过程的初级模式, 提高稻田甲烷排放量估算的精度和对未来甲烷排放量进行预测。

参 考 文 献

- 1 Crutzen, P. J., 1991, Methane sink and sources, *Nature*, **350**, 380~381.
- 2 上官行建、王明星等, 1993, 稻田甲烷的排放规律, *地球科学进展*, **8**(5), 23~35.
- 3 Schutz, H. et al., 1989, A 3-year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rate from an Italian rice paddy, *J. Geophys. Res.*, **94**, 16406~16416.
- 4 Wang Mingxing et al., 1990, CH_4 emission from Chinese rice fields, *Acta Meteorologica Sinica*, **4**, 265~275.
- 5 Takai, Y., 1970, The mechanism of methane formation in flooded paddy soil, *Soil Sci. and Plant Nutr.*, **16**, 238~244.
- 6 上官行建、王明星, 1993, 稻田土壤中甲烷的产生, *地球科学进展*, **8**(5), 1~12.
- 7 Sass, R. L., Fischer, F. M., Harcombe, P. A. and Turner, F. T., 1990, Methane production and emission in a Texas agriculture wetland, *global Biogeochemical Cycles*, **4**, 47~68.
- 8 Bender, M. and Conrad, R., 1994, Methane oxidation activity in various soils and freshwater sediment, occurrence, characteristics, vertical profiles, and distribution on grain size fractions, *J. Geophys. Res.*, **99**, D8, 16, 531~540.
- 9 De Bont, J. A. M., Lee, K. K. and Bouldin, D. F., 1978, Bacterial oxidation of methane in a rice paddy, *Ecol. Bull.*, (Stockholm), **26**, 91~96.
- 10 Yagi, K., Kumagai, K., Tsuruta, H. and Minami, K., 1995, Emission, production, and oxidation of methane in a Japanese paddy field, *Adv. Soil. Sci., Soils and Global Change*, eds. R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B. A. Stewart, Lewis Publishers, 231~243.
- 11 Conrad, R. and Rothfuss, F., 1991, Methane oxidation in the soil surface layer of a flooded rice field and the effect of ammonium, *Biol. Fertil. Soils*, **12**, 28~32.
- 12 上官行建、王明星, 1993, 稻田甲烷的传输, *地球科学进展*, **8**(5), 13~22.
- 13 陈德章、王明星, 1993, 我国西南地区的稻田甲烷排放, *地球科学进展*, **8**(5), 47~54.
- 14 丁爱菊、王明星, 1995, 稻田甲烷排放的初级模式, *大气科学*, **19**(6), 733~740.
- 15 Wassmann, R., Schuetz, H., Papen, H., Rennenberg, H., Seiler, W., Dai Aiguo, Shen Renxing, Shanguan Xingjian and Wang Mingxing, 1993, Quantification of methane emissions from Chinese rice fields (Zhejiang Province) as influenced by fertilizer treatment, *Biogeochemistry*, **20**, 83~101.
- 16 Wassmann, R., Papen, H., Rennenberg, H., Seiler, W., Wang Mingxing and Shanguan Xingjian, 1993, Adequate fertilizer application as an essential element in intercomparative studies on methane emission from rice fields, Paper for ECE / PRC Workshop on Contribution to Global Change, October 1992, Beijing.
- 17 Chen, Z. L., Li, D. B., Shao, K. S. and Wang, B. J., 1993, Features of CH_4 emission from rice fields in Beijing and

Nanjing, *Chemosphere*, 26, 239~245.

- 18 Wang Mingxiang, Shanguan Xingjian, Shen Renxing, Wassmann, R. and Seiler, W., 1993, Methane production, emission and possible control measures in the rice agriculture, *Advances in Atmospheric Sciences*, 10(3), 307~314.

Methane Emission and Mechanisms of Methane Production, Oxidation, Transportation in the Rice Fields

Wang Mingxing, Li Jing and Zheng Xunhua

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract CH_4 emission rates from Chinese rice fields have been measured in all the five major rice culture regions in China. Four types of diurnal variations of CH_4 emission rates have been found. Seasonal variation patterns of CH_4 emission differ slightly in different field locations, where climate system, cropping system and other factors are different. CH_4 production mainly occurs in the reduced soil layer (2~20 cm). CH_4 is oxidized mainly in the thin surface layer of paddy soil, and the rhizosphere of rice plants. Production and oxidation rates are effected by many factors. CH_4 transport through rice plant, gas bubble and diffusion in flooded water. Relative importance of each route is different in different stages during rice growing. The effects of various mineral fertilizers on CH_4 emission were rather contradictory, while the amount and the type of organic manure will enhance CH_4 emission from rice fields, which has been also indicated by CH_4 production rates. Application of fermented sludges from biogas generators and farmyard-stored manure instead of fresh organic manure seem to be promising. China's rice fields contribute about 9.67~12.66 Tg/a to the atmosphere. The total methane emission from global rice fields can be estimated as 35~56 Tg/a.

Key words methane emission diurnal variation seasonal variation oxidation and transportation influence factors