

稻田甲烷传输的研究进展^①

张晓艳^{1,2}, 马静¹, 李小平¹, 徐华^{1*}, 蔡祖聪¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 稻田生态系统中 CH₄ 排放是由土壤中 CH₄ 产生、氧化和向大气传输这 3 个过程相互作用的结果, CH₄ 传输主要通过液相扩散、冒气泡和植株传输 3 种方式。这 3 种途径的相对强弱取决于水稻植株通气组织的完善与否以及水稻品种、种植密度和温度的季节变化等。但大量研究表明, 稻田土壤中产生的 CH₄ 绝大部分通过植株通气组织排放到大气中。在应用稳定性碳同位素方法研究水稻植株向大气传输 CH₄ 的过程时发现, 在传输过程也会发生同位素分馏, 据现有文献报道, CH₄ 传输的同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$ 有两种计算方法, 获得的结果也比较接近, 为 -18‰~-9‰。但研究方法还存在一些缺陷, 可能对结果的准确性产生影响。此外有关稻田 CH₄ 传输在模型的建立方面还比较缺乏。

关键词: CH₄ 排放; CH₄ 传输; 稻田土壤; 水稻植株; 同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$

中图分类号: S131; X511

CH₄ 是大气中仅次于 CO₂ 的重要温室气体, 稻田是大气的 CH₄ 重要来源, 其 CH₄ 排放量达到 25.6 Tg/a^[1], 单位质量的 CH₄ 在百年尺度上的增温潜势是 CO₂ 的 25 倍, 减少其排放对缓解潜在的全球增温势比减少 CO₂ 的排放更为有效^[2]。

稻田生态系统中 CH₄ 的排放是土壤中有有机碳一系列复杂转化过程的产物。这些转化过程的发生需要一定的土壤环境条件, 同时需要土壤微生物的参与。稻田 CH₄ 排放是由土壤中 CH₄ 产生、氧化和向大气传输这 3 个过程相互作用的结果。只有当土壤中的 CH₄ 积累到一定浓度, 在土壤及传输中被较少地氧化, 而又有较畅通的传输路径时, 才会出现较大的排放量。向大气传输路径的畅通能够使土壤中的 CH₄ 很快排向大气, 因此 CH₄ 排放效率是影响 CH₄ 再氧化的重要因素。研究稻田 CH₄ 的传输能更好地了解 CH₄ 排放的基本过程及其发生的条件, 是认识稻田生态系统 CH₄ 排放变化规律的基础。本文对近年来稻田生态系统中 CH₄ 传输的研究做了一些总结。

1 稻田甲烷传输的途径

稻田生态系统中产生的 CH₄ 释放到大气主要经过 3 种途径: 液相扩散, 冒气泡和通过植株传输^[3]。这 3 种途径的相对强弱取决于水稻组织的完善与否

以及水稻的品种、种植密度和温度的季节变化等。

1.1 水稻植株通气组织

水稻植株通气组织的主要功能是把大气中的 O₂ 向植株根系传输以维持水稻的生长, 同时, 稻田土壤中产生的 CH₄ 也可以通过植株通气组织排放到大气中。通过水稻植株通气组织排放的 CH₄ 量与植株蒸腾量没有定量关系, 说明在水稻植株体内, CH₄ 主要通过气相扩散排放。水稻植株传输稻田 CH₄ 的可能机制^[4]是: 由于根周围的土壤溶液与根内组织间存在 CH₄ 的浓度梯度, CH₄ 首先从土壤溶液扩散到根表面水膜中, 然后进入根皮层细胞壁的溶液中, CH₄ 在根皮层处逸出, 经胞间孔隙和通气组织转运到茎部, 最终 CH₄ 主要通过位于低叶位的叶鞘表皮中的微孔排放进入大气中。已有研究^[5]发现, 分布在稻田土壤中茂密的水稻根系能主动汲取溶有 CH₄ 的土壤溶液, 然后依靠上述方式使 CH₄ 进入通气组织, 进而排到大气中; 曹云英等^[6]的室内试验也验证了该结论。

稻田生态系统中, 水稻植株是 CH₄ 排放的主要途径, 淹水时, 通过水稻植株排放的 CH₄ 可达总排放量的 80% 以上^[7]。测定通过水稻植株通气组织排放的方法主要有以下 3 种。

(1) 隔板分隔法: 用已从正中间锯成两半的圆形塑料隔板(中间有孔隙)罩住塑料盆栽桶顶部, 使隔

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41071169)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05020200)和科技部国际科技合作项目(S2012GR0080)资助。

* 通讯作者(hxu@issas.ac.cn)

作者简介: 张晓艳(1986—), 女, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事农田温室气体排放规律及其机理研究。E-mail: zhangxy@issas.ac.cn

板将水稻植株与其下方的土壤、水层完全分隔开来,隔板上的孔隙允许稻茎完整无损地从中穿过,同时不让下方的气体从孔隙中扩散至上层空间。从隔板上方用密闭箱法采集气样分析即可获得通过植株通气组织排放的 CH_4 量。而从隔板下方采集气样分析可获得通过气泡和扩散途径排放的 CH_4 量。若观测田间试验条件下植株通气组织的 CH_4 排放通量,可将盆栽试验塑料桶的底部去掉,然后插入田间土壤即可观测。

(2) 密封箱法:将尺寸较小的静态箱放置在水稻行间,按一定时间间隔测定箱内 CH_4 含量,即可获得通过扩散和气泡排放的 CH_4 量^[8]。通过与包括植株的密封箱法测定结果比较,即可计算出通过水稻植株排放的 CH_4 占总排放量的比例。

(3) 植株切割法:将水稻植株水面(无水层时为土面)以上的部分全部切除,并密封切口,对比植株切割前后气体排放的量,即可获得通过植株通气组织排放的气体量^[9-11]。

大量研究表明^[9-10, 12-16],稻田土壤中产生的 CH_4 绝大部分通过植株通气组织排放到大气中。Yu 等^[17]采用分隔箱法观测了水稻植株 CH_4 的排放量,发现植株通气组织对稻田 CH_4 排放的贡献率为 83%~84%,是稻田 CH_4 排放的主要途径。影响水稻植株传输 CH_4 的因素很多,如水稻品种、水稻株高和形状、水稻生长状况、稻田土壤水中 CH_4 的浓度等。Kludze 等^[18]的研究表明:水稻植株传输 CH_4 的效率与水稻根系长度成正相关。分蘖数多的水稻植株传输 CH_4 的能力大于分蘖数少的水稻植株,在分蘖期,较小叶表面积的水稻植株排放的 CH_4 也低于较大叶表面积的水稻^[19]。根系分压的微小增加也会提高植株传输 CH_4 效率^[20]。水稻光合速率和蒸腾速率并不影响植株对稻田 CH_4 的传输,增加 CO_2 浓度或者将植株置于暗处对植株的传输效率没有显著的影响^[21-22]。土壤溶液中 CH_4 浓度越高,通过植株排放的 CH_4 量越大^[23]。Wassmann 等^[19]发现水稻植株通气组织中存在明显的 CH_4 浓度梯度,水层以下的通气组织中 CH_4 浓度最高。水稻品种也是影响植株传输 CH_4 的一个重要因素,在中国^[24-25]、印度^[26-28]、日本^[29-30]、美国^[28, 31-32]进行的研究已经证实了这一点。Lindau 等^[33]6 个水稻品种对 CH_4 排放的影响,低秆品种 CH_4 排放量约为高秆品种的 64%。水稻干重、根体积、根系干重和孔径、分蘖数以及产量都与稻田 CH_4 排放量呈正相关^[34]。Aulakh 等^[13]研究了 12 个水稻品种,发现通过水稻植株排向大气的 CH_4 占总排放量的 60%~90%,植株传输 CH_4 能力和水稻品种的生理形态特征以及水稻生长期密切相关,

与根干生物量以及地上部分生物量呈正相关。然而,这种相关关系在一定程度上取决于水稻品种以及水稻生长阶段。此外,和淹水土壤中根系与通气组织之间的孔隙呈正相关^[18]。

由于水稻植株传输 CH_4 与其形态、生理等特征具有密切的关系,因此,水稻植株通气组织对稻田 CH_4 排放的贡献率随生长季节而变化^[35]。对湖南桃源早、晚稻田的观测发现^[10, 16],无论是早稻还是晚稻,水稻植株传输 CH_4 的相对重要性均随水稻的生长而增加,在抽穗中期达到最大,以后又随水稻的成熟而逐渐降低,水稻植株高度与其传输能力之间存在较密切的相关性。意大利稻田^[9]的观测结果显示,水稻植株对稻田 CH_4 排放的贡献率随水稻生长而逐渐增大。菲律宾和德国的盆栽试验发现^[12-13],从苗期到开花期,水稻植株的 CH_4 传输能力逐渐增大,水稻植株的 CH_4 传输能力与其分蘖数呈线性相关。水稻植株传输 CH_4 能力出现这种季节性变化的原因可能是:在水稻生长初期,植株尚未发育,其通气组织作为 CH_4 传输路径的作用还相对较小,且由于根系没有完全发育,对气泡的阻碍作用较弱,土壤中产生的 CH_4 通过气泡和液相扩散等方式排向大气的比例较高;在水稻生长中期,植株通气组织较发达,茂密的根系主动汲取溶有 CH_4 的土壤溶液,使 CH_4 通过植株通气组织排放到大气中比例增加,同时,充分发育的水稻根系形成屏障,阻碍稻田 CH_4 通过气泡和液相扩散等方式排向大气;在水稻成熟期,植株老化,其传输 CH_4 的能力也相应降低^[36]。

1.2 气泡

气泡迸发是 CH_4 由土壤向大气排放的另一种途径。当土壤中 CH_4 产生率不是很高时一般不会产生或只产生极少量的气泡,一旦 CH_4 产生率超过某一临界值,在土壤溶液中 CH_4 已经达到饱和的情况下来不及扩散的 CH_4 气体分子便合并成为 CH_4 气体分子团,形成富含 CH_4 的气泡。在浮力作用下气泡迅速上浮,由于气泡上升速度很快,因此绝大部分能穿过有氧层到达水气界面破裂而释放出 CH_4 。

水稻生长季里,稻田土壤中产生的 CH_4 也可以通过气泡的形式直接排放到大气中。气泡的出现要求水溶液中气体的浓度较高,且产生压力超过土壤溶液的表面张力,因而通过气泡排放气体主要出现在水稻植株通气组织较少的生长前期、通气组织遭到破坏的衰老期以及土壤中有大量有机物(产甲烷基质)存在的时候^[8-10]。

通过气泡排放的气体通常采用以下两种方法进行测定:

(1) 漏斗法: 将一个充满水、顶端封闭的漏斗倒置在土壤表面, 扰动土壤, 迫使气泡排放, 气泡逐渐向漏斗顶端聚集。用注射器从漏斗顶端采集捕集到的气泡, 即可测得气泡排放的 CH_4 量^[9, 14]。

(2) 静态箱法: 将尺寸较小的静态箱放置在水稻行间, 按一定时间间隔测定箱内气体的含量, 即可获得通过气泡排放的气体量^[8]。

气泡是 3 种排放途径中效率最高的一种^[10], 原因在于: 气泡中 CH_4 浓度较高, 并且其中基本没有发现 O_2 的存在, 气泡中 CH_4 被氧化的可能性极小。气泡对稻田 CH_4 排放的贡献率主要取决于土壤 CH_4 产生能力、土壤温度以及水稻植株生长状况。在双季稻地区早稻生长季节和单季稻生长季节, 由于水稻根系不发达时, 温度也相应较低, 稻田土壤中形成气泡的可能性较大; 当温度提高时, 水稻根系已较为发达, 不利于气泡的形成, 通过气泡排放的 CH_4 也很有限。所以, 在双季稻地区早稻生长季节和单季稻生长季节, 气泡可能并不是稻田 CH_4 排放的主要途径。但如果早稻移栽前, 土壤中施用了较大数量的易分解有机肥或绿肥还田, 且当温度较高时, 气泡可能成为 CH_4 排放的主要途径。晚稻移栽初期, 气泡可能是 CH_4 排放的主要途径。上官行健等^[10]在湖南桃源晚稻田的观测发现, 晚稻移栽初期 (7 月底), 土壤中含有早稻根等残余有机物以及人工添加的丰富的有机肥料, 且气温很高, 水稻植株尚未完全发育, 稻田中气泡生成较多, 通过气泡逸出成为稻田 CH_4 排放的主要途径。气泡排在晴天大于阴天, 下午大于上午, 不种水稻的土壤中通过气泡的排放率要明显大于种水稻的情况。Wassmann 等^[8]在菲律宾早、雨季稻田的观测结果显示, 与单施无机肥处理比较, 稻田施氮 60 kg/hm^2 的稻草, 土壤中 CH_4 产生率增大, 气泡对稻田 CH_4 排放的贡献率也明显增加。

1.3 液相扩散

液相扩散是 CH_4 气体分子在浓度梯度下从高浓度向低浓度的一种任意运动。在稻田土壤的不同深度, CH_4 浓度是不同的, 在耕作层的氧化层附近, 由于 O_2 的存在, CH_4 浓度极小, CH_4 浓度随深度的增加而增大, 在一定深度处形成最大值。 CH_4 在灌溉水的不同深度的浓度也有明显的梯度, 相对于紧贴水面的空气薄层中的 CH_4 浓度来说, 溶解在水中的 CH_4 浓度要高出很多^[10], 这说明土壤中存在 CH_4 向上层土壤乃至大气的液相扩散机制。

通过液相扩散排放的气体量可以用尼龙筛法进行

测定: 将孔径大小为 $100 \mu\text{m}$ 的尼龙网罩在无植株的土壤表面, 尼龙网可以阻止气泡的排放, 但允许气体的扩散, 从而可以通过密封箱法测得通过液相扩散排放的气体量^[9, 11]。

由于土壤中气体浓度差的存在, 在浓度梯度的驱使下, CH_4 也可以通过扩散排放到大气中。土壤通过液相扩散向大气排放的 CH_4 量与土壤表层水中 CH_4 浓度、风速、气温及土壤向表层水供应 CH_4 的速率有关。因为气体在溶液中的扩散速率较气相扩散慢约 4 个数量级, 所以 CH_4 通过液相扩散的速率比以气相扩散为主的植物通气组织的传输要慢得多。水稻植物体能遮挡阳光, 降低气温对水层温度的影响并且使水面边界层的风速很小, 这些因素使 CH_4 通过液相的扩散减少, 平均只有气泡排放的 10% 左右^[10]。

Schütz 等^[9]意大利稻田的观测结果显示, 液相扩散对稻田 CH_4 排放的贡献率通常低于 1%。湖南桃源早、晚稻田的观测发现^[10, 16], 液相扩散对早、晚稻田 CH_4 排放的贡献率分别为 2.68% 和 4.50%, 只有气泡的 10% 左右, 液相扩散的贡献率在下午最大时能达到气泡的 18% 左右。液相扩散对稻田 CH_4 排放的贡献小的原因在于: 气体在溶液中的扩散速率比气相扩散慢约 4 个数量级, 因而 CH_4 通过液相扩散的速率比以气相扩散为主的植株通气组织的传输要慢得多; 水稻植株能遮挡阳光, 降低气温对水层的影响并且使水面边界层的风速很小, 从而使通过液相扩散的 CH_4 排放量减少。

在水稻的不同生长阶段, 由于水稻生理、生化活动和气温环境条件的变化, 通过水稻植株通气组织、气泡和液相扩散 3 条途径传输的 CH_4 量有很大差异。表 1 归纳了 3 条不同排放途径对稻田 CH_4 排放的相对贡献率。

2 水稻植株传输 CH_4 过程的机理

2.1 同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$

^{12}C 和 ^{13}C 均为稳定性同位素, 它们的自然丰度分别为 98.89% 和 1.11%。通常用 R 来表示某一元素的重同位素原子丰度与轻同位素原子丰度之比, 如 $R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 1.11/98.89$, 用 $\delta^{13}\text{C}$ (‰) 来表示物质的同位素组成, 定义为^[37]: $\delta^{13}\text{C}$ (‰) = $1\ 000 \times (R_{\text{sa}} - R_{\text{st}}) / R_{\text{st}}$ 式中, R_{sa} 为待测样品中碳元素的重轻同位素丰度之比 $^{13}\text{C}_{\text{sa}}/^{12}\text{C}_{\text{sa}}$; R_{st} 为国际通用碳同位素分析标准物的重轻同位素丰度之比 $^{13}\text{C}_{\text{st}}/^{12}\text{C}_{\text{st}}$, 通常采用美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组拟箭石化石 (Peedee Belemnite, PDB) 中 ^{13}C 与 ^{12}C 的比值。

表 1 稻田 CH₄ 各个排放途径的贡献率

Table 1 Contribution rates of methane transport routes in paddy soil

地点	水稻种植	观测时间	各个排放途径的贡献率 (%)			参考文献
			植株通气组织	气泡	液相扩散	
湖南桃源	早稻	整个生长季	73.18	24.14	2.68	上官行健等 ^[10]
	晚稻	整个生长季	54.98	40.52	4.50	
浙江杭州	早稻	整个生长季	82.47	-	-	闵航等 ^[15]
	晚稻	整个生长季	70.9~89.0	-	-	
辽宁沈阳 ^①	单季稻	水稻拔节期	83.0~83.8	-	-	Yu 等 ^[17]
Vercelli, Italy ^②	单季稻	6月6日	0	100	<1	Schütz 等 ^[11]
		7月9日	48	52	<1	
		7月31日	90	10	<1	
		8月27日	97	3	<1	
Los Baños, Philippines	旱季稻	整个生长季	-	15 ^③	-	Wassmann 等 ^[8]
			-	55 ^④	-	
	雨季稻	整个生长季	-	37 ^③	-	
			-	52 ^④	-	

注：①盆栽试验；②水稻于5月份移栽；③施尿素处理；④施（尿素+稻草）处理。

稳定性同位素的物理化学性质存在微小的差异^[38]，由于这种微小的性质差别，经物理、化学或生物的过程之后，体系不同部分的同位素组成将发生微小的、但可测量的改变，称为同位素分馏^[37]。在平衡条件下，经过同位素分馏之后两种物质或不同相的同一物质中某元素的相应同位素比值之商（ α ）或 δ 值之差（ ε ）称为同位素分馏系数。假设有一化学反应从A→B，同位素分馏系数可表示为^[39]：

$$\alpha_{A-B} = (\delta_A + 1000) / (\delta_B + 1000)$$

或

$$\varepsilon_{A-B} = (1 - \alpha_{A-B}) \times 1000 = (\delta_B - \delta_A)$$

在空气中，¹²CH₄比¹³CH₄扩散地更快。因此，¹²CH₄的扩散系数比¹³CH₄的大，已有室内试验^[40-41]测得CH₄从静止的、纯净的水中传输扩散时的同位素分馏系数为1.0008，表明该同位素分馏为1‰，意味着轻同位素在通过气-水界面时比重同位素更快。在湿地和沼泽中，与纯水相比气体交换速率降低，因此使得同位素分馏增加至2‰~3‰^[40]。当CH₄从水体中扩散出来，那么还溶解在水中的CH₄则变得更富集¹³C。

已有研究^[42-43]表明自然释放的气泡中的气体成分和 $\delta^{13}\text{C}$ 与储存在沉积物中气泡的没有差异，这意味着通过冒泡所传输的CH₄没有产生同位素分馏。

稻田土壤中，水稻植株向大气传输CH₄的过程也会发生同位素分馏作用，在水稻植株中，其孔隙内的CH₄的同位素组成较排放的要富集¹³C^[44-46]。即¹²CH₄能更快地被水稻植株传输。同位素分馏系数 $\varepsilon_{\text{传输}}$ 即表

示水稻植株传输导致的 $\delta^{13}\text{C}$ CH₄的变化，可由田间排放的 $\delta^{13}\text{C}$ CH₄与孔隙水的 $\delta^{13}\text{C}$ CH₄相减获得^[47]：

$$\varepsilon_{\text{传输}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4 \text{ 排放}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4 \text{ 孔隙水}}$$

或由田间排放的 $\delta^{13}\text{C}$ CH₄与水稻植株通气组织中的 $\delta^{13}\text{C}$ CH₄相减获得^[48]：

$$\varepsilon_{\text{传输}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4 \text{ 排放}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4 \text{ 水稻植株通气组织中}}$$

据现有文献报道，CH₄传输的同位素分馏系数 $\varepsilon_{\text{传输}}$ 有两种计算方法^[45-48]，获得的结果也比较接近^[46, 48]。Tyler等^[49]指出CH₄在水稻植株中传输的同位素分馏系数 $\varepsilon_{\text{传输}}$ 随水稻品种、水稻生长阶段的不同而有所不同，而Bilek等^[45]研究发现，两种水稻品种Lemont和Mars的 $\varepsilon_{\text{传输}}$ 之间的差异并不大。表2总结了不同研究中两种计算方法下的CH₄传输的同位素分馏系数 $\varepsilon_{\text{传输}}$ 值。

2.2 传输过程中同位素分馏的模型

已有水稻初步模型建立^[44-45, 49]。Tyler等^[49]开发了一种比较精简的模型，已被Bilek等^[45]和Popp等^[52]引用。该模型依靠测定根际以及排放的CH₄的碳同位素组成，并用植株传输对同位素的影响（约为11‰），来校正排放的 $\delta^{13}\text{C}$ 。但是该模型被过度简化，¹³C的改变只考虑了氧化和传输后两个去向，并没有考虑到剩余的植株孔隙内以及根周围中富集¹³C的CH₄。Chanton等^[44]研究认为，要使所测得的结果得到准确的阐释，需要两个或三个同位素效应模型，一个关于CH₄氧化，另外一个或两个关于CH₄传输。一个模型难以满足同位素分馏过程中复杂的转化问题。

表2 稳定性碳同位素方法观测稻田 CH₄ 传输同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$ Table 2 The isotope fractionation factor $\epsilon_{\text{transport}}$ of CH₄ during transport in paddy soil measured with the stable carbon isotope technique

水分管理方式	测定方法	$\epsilon_{\text{传输}}$	参考文献
持续淹水	田间排放的 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 减去孔隙水的 $\delta^{13}\text{CH}_4$	-17‰ ~ -9‰	Conrad 和 Klose ^[47]
	田间排放的 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 减去水稻植株通气组织中的 $\delta^{13}\text{CH}_4$	-12.2‰ ± 1.4‰	Tyler 等 ^[49]
		-11.4‰ ± 0.7‰	Chanton 等 ^[44]
		-11.4‰ ± 2.2‰	Bilek 等 ^[45]
		-16‰ ~ -11‰	Krüger 等 ^[48]
	-18.37‰ ± 2.08‰	Krüger 等 ^[50]	
间歇灌溉	田间排放的 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 减去水稻植株通气组织中的 $\delta^{13}\text{CH}_4$	-16‰ ~ -11‰	Han 等 ^[51]

3 研究展望

稻田生态系统中 CH₄ 的传输是影响 CH₄ 排放量的重要因素, 对稻田 CH₄ 传输的深入研究尤为重要, 但通过对以往研究的总结, 我们发现仍存在以下问题。

(1) 对于已有的稻田生态系统中 CH₄ 传输的研究结果, 缺少一个能全面计算气体传输过程中发生同位素分馏的模型。在计算传输效应时, 不能量化出根际氧化的 CH₄ 同位素组成。已有模型的建立相对较少^[53-54], 且不够完善, 应该加强这方面的工作, 以便于已有结果能更好地应用于 CH₄ 的排放机理研究^[55]。

(2) 现有同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$ 的报道都来自于西方国家稻田, 这些稻田在水稻生长期里持续淹水, 与我国常用的间隙灌溉水分管理方式完全不同, 且其施氮量及水稻品种也不同于我国。虽然已有报道中未发现水稻品种对同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$ 的显著影响^[45,47], 但我国水稻种植面积大、分布广、品种繁多, 既有单季稻, 也有早、晚稻, 水稻种植具有自身鲜明的水肥管理特色, 同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$ 可能会不同于西方国家稻田。

(3) 以往研究稻田 CH₄ 传输同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$ 的计算方法存在一些缺陷, 可能影响计算结果的准确度。孔隙水或土壤排放的 CH₄ 中可能包含未被氧化的 CH₄, 因此其 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 并不能很好地代表已被 CH₄ 氧化细菌氧化但还未经水稻植株传输的 $\delta^{13}\text{CH}_4$; 通常用针直接取几棵水稻通气组织里的气样混合后分析其 $\delta^{13}\text{CH}_4$ 值, 这种方式取得的 CH₄ 可能包含植株上部已经扩散分馏的 CH₄, 多次采样还可能混入空气带来误差。因此, 稻田 CH₄ 传输同位素分馏系数 $\epsilon_{\text{传输}}$ 的研究方法应该进一步改进, 使获得的结果更准确, 能更好地为 CH₄ 排放机理的研究提供基础。

参考文献:

[1] Yan XY, Akiyama H, Yagi K, Akimoto H. Global estimations of

the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23: 1-15

[2] IPCC. Climate change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[R/OL]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>

[3] Schütz H, Schroder P, Rennenberg H. Role of plants in regulating the methane flux to the atmosphere // Mooney H, Holland E, Sharkey T. Trace Gas Emissions from Plants. San Diego: Academic Press, 1991: 29-64

[4] Nouchi I. Mechanisms of methane transport through rice plants // Minami K. CH₄ and N₂O: Global Emission and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources. Tokyo, Japan: Yokendo Publishers, 1994: 87-105

[5] Nouchi I, Mariko S, Aoki K. Methanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. *Plant Physiol.*, 1990, 94: 59-66

[6] 曹云英, 许锦彪, 朱庆森. 水稻根系对甲烷传输速率的影响. *安徽农业科学*, 2003, 31(1): 90-92

[7] Hosono T. Studies on methane flux from rice paddies and the mechanism of methane emission through rice plants. *Bulletin of the National Institute of Agro-Environmental Sciences*, 2000, 18: 33-80

[8] Wassmann R, Buendia LV, Lantin RS, Bueno CS, Lubigan LA, Umali A, Nocon NN, Javellana AM, Neue HU. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Baños, Philippines. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 107-119

[9] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. *Biogeochemistry*, 1989, 7(1): 33-53

[10] 上官行健, 王明星, 陈德章, 沈壬兴. 稻田 CH₄ 的传输. *地球*

- 科学进展, 1993, 8(5): 13-22
- [11] Schütz H, Seiler W. Methane flux measurements: Methods and results//Andrae MO, Schimel DS. Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. New York: John Wiley and Sons, 1989: 209-228
- [12] Aulakh MS, Bodenbender J, Wassmann R, Rennenberg H. Methane transport capacity of rice plants. I. Influence of methane concentration and growth stage analyzed with an automated measuring system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 357-366
- [13] Aulakh MS, Bodenbender J, Wassmann R, Rennenberg H. Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 367-375
- [14] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil. *Plant and Soil*, 1986, 92: 223-233
- [15] 闵航, 陈美慈, 钱泽澍. 水稻田的甲烷释放及其生物学机理. *土壤学报*, 1993, 30(2): 125-130
- [16] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理. *大气科学*, 1998, 22(4): 600-612
- [17] Yu KW, Wang ZP, Chen GX. Nitrous oxide and methane transport through rice plants. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 24: 341-343
- [18] Kludze HK, Delaune RD, Patrick JWH. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 386-391
- [19] Wassmann R, Neue HU, Alberto MCR, Lantin RS, Bueno C, Llenaresas D, Arah JRM, Papen H, Seiler W, Rennenberg H. Fluxes and pools of methane in wetland rice soils with varying organic inputs. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1996, 42: 163-173
- [20] Hosono T, Nouchi I. Effect of gas pressure in the root and stem base zone on methane transport through rice bodies. *Plant and Soil*, 1997, 195(1): 65-73
- [21] Ando T, Yoshida S, Nishiyama I. Nature of oxidizing power of rice roots. *Plant and Soil*, 1983, 72: 57-71
- [22] Oremland RS, Culbertson CW. Importance of methane-oxidizing bacteria in the methane budget as revealed by the use of a specific inhibitor. *Nature*, 1992, 356: 421-423
- [23] Sass RL, Fisher JrFM. Methane emission from rice paddies: A process study summary. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 119-127
- [24] Jia ZJ, Cai ZC, Xu H, Li XP. Effect of rice plants on CH₄ production, transport, oxidation and emission in rice paddy soil. *Plant and Soil*, 2001, 230(2): 211-221
- [25] Singh S, Kashyap AK, Singh JS. Methane flux in relation to growth and phenology of a high yielding rice variety as affected by fertilization. *Plant and Soil*, 1998, 201(1): 157-164
- [26] Adhya TK, Rath AK, Gupta PK, Rao VR, Das SN, Parida KM, Parashar DC, Sethunathan N. Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18(3): 245-248
- [27] Shao KS, Li Z. Effect of rice cultivars and fertilizer management on methane emission in a rice paddy in Beijing. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 139-146
- [28] Trolldenier G. Mineral nutrition and reduction processes in the rhizosphere of rice. *Plant and Soil*, 1977, 47(1): 193-202
- [29] Mosier AR, Mohanty SK, Bhadrachalam A, Chakravorti SP. Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9: 61-67
- [30] Yagi K, Minami K. Emission and production of methane in the paddy fields of Japan. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 1991, 25(3): 165-171
- [31] Satpathy SN, Mishra S, Adhya TK, Ramakrishnan B, Rao VR, Sethunathan N. Cultivar variation in methane efflux from tropical rice. *Plant and Soil*, 1998, 202(2): 223-229
- [32] Seiler W, Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Scharffe D. Methane emission from rice paddies. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1984, 1: 241-268
- [33] Lindau CW, Bollich PK, DeLaune RD. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 54(1): 109-114
- [34] Ueckert J, Hurek T, Fendrik I, Niemann EG. Radial gas diffusion from roots of rice (*Oryza sativa* L.) and kallar grass (*Leptochloa fusca* L. Kunth), and effects of inoculation with *Azospirillum brasilense* Cd. *Plant and Soil*, 1990, 122(1): 59-65
- [35] 阎丽娜, 李霞. 水稻对稻田甲烷排放的影响. *中国农学通报*, 2008, 24(10): 471-476
- [36] 丁维新, 蔡祖聪. 植物在 CH₄ 产生、氧化和排放中的作用. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1379-1384
- [37] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 2000: 4, 74-78, 193-195
- [38] 李博. 现代生态学讲座. 北京: 科学出版社, 1995: 161-188
- [39] Hayes JM. Factors controlling ¹³C contents of sedimentary organic compounds: Principles and evidence. *Marine Geology*, 1993, 113: 111-125
- [40] Happell J, Chanton JP, Showers W. Methane transfer across the

- water-air interface in stagnant wooded swamps of Florida. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40: 290–298
- [41] Knox M, Quay PD, Wilbur D. Kinetic isotope fractionation during air-water gas transfer of O₂, N₂, CH₄ and H₂. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 20 335–20 343
- [42] Chanton JP, Martens CS. Seasonal variations in the isotopic composition and rate of methane bubble flux from a tidal freshwater estuary. *Global Biogeochemical Cycles*, 1988, 2: 289–298
- [43] Martens CS, Chanton JP. Radon tracing of biogenic gas equilibration and transport from methane saturated sediments. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 3 451–3 459
- [44] Chanton JP, Whiting GJ, Blair NE, Lindau CW, Bollich PK. Methane emissions from rice: Stable isotopes, diurnal variations, and CO₂ exchange. *Global Biogeochem Cycles*, 1997, 11: 15–27
- [45] Bilek RS, Tyler SC, Sass RL, Fisher FM. Differences in CH₄ oxidation and pathways of production between rice cultivars deduced from measurements of CH₄ flux and $\delta^{13}\text{C}$ of CH₄ and CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 1 029–1 044
- [46] Tyler SC, Crill PM, Brallsford GW. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fractionation of methane during oxidation in a temperate forested soil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(6): 1 625–1 633
- [47] Conrad R, Klose M. Effect of potassium phosphate fertilization on production and emission of methane and its ^{13}C -stable isotope composition in rice microcosms. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(11): 2 099–2 108
- [48] Krüger M, Eller G, Conrad R, Frenzel P. Seasonal variation in pathways of CH₄ production and in CH₄ oxidation in rice fields determined by stable carbon isotopes and specific inhibitors. *Global Change Biology*, 2002, 8(3): 265–280
- [49] Tyler SC, Bilek RS, Sass RL, Fisher FM. Methane oxidation and pathways of production in a Texas paddy field deduced from measurements of flux, $\delta^{13}\text{C}$, and δD of CH₄. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(3): 323–348
- [50] Krüger M, Frenzel P. Effects of N-fertilisation on CH₄ oxidation and production, and consequences for CH₄ emissions from microcosms and rice fields. *Global Change Biology*, 2003, 9(5): 773–784
- [51] Han GH, Yoshikosh H, Nagai H, Yamada T, Saito M, Miyata A, Harazono Y. Concentration and carbon isotope profiles of CH₄ in paddy rice canopy: Isotopic evidence for changes in CH₄ emission pathways upon drainage. *Chemical Geology*. 2005, 218: 25–40
- [52] Popp TJ, Chanton JP, Whiting GJ, Grant N. Evaluation of methane oxidation in the rhizosphere of a *Carex* dominated fen in North Central Alberta. *Biogeochemistry*. 2000, 51: 259–281
- [53] Chanton JP. The Effect of gas transport mechanism on the isotope signature of methane in Wetlands. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(5): 753–768
- [54] Xu SP, Jaffé PR, Mauzerall DL. A process-based model for methane emission from flooded rice paddy systems. *Ecological Modelling*, 2007, 205(3/4): 475–491
- [55] 傅志强, 黄璜. 水稻对稻田甲烷排放的影响. *作物研究*, 2006(3): 266–271

Reviews on Methane Transport in Rice Paddy Field

ZHANG Xiao-yan^{1,2}, MA Jing¹, LI Xiao-ping¹, XU Hua¹, CAI Zu-cong¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: CH₄ emission is an interaction result of CH₄ production, oxidation and transport in rice paddy field. CH₄ emits into the atmosphere primarily through the following three channels: liquid diffusion, bubble and plant aerenchyma. The relative contributions of the three pathways to CH₄ emission varies according to organic loading, rice cultivar, rice planting density, seasonal variation in temperature, etc. A large number of researches indicated that CH₄ generated in paddy soils mostly emitted into the atmosphere through the aerenchyma of rice plants. The application of stable carbon isotope technique to investigate CH₄ transport through the aerenchyma of rice plants found that isotope fractionation existed in the process of CH₄ transport. It is reported that there are two ways to calculate isotope fractionation factor $\epsilon_{\text{transport}}$ of CH₄ transport, and the results obtained in the two ways (-18‰ ~ -9‰) are quite approximate. But previous research methods have some defects, which may affect the accuracy of the results. Furthermore there lacks of model about CH₄ transport in paddy soil.

Key words: CH₄ emissions, CH₄ transport, Rice paddy field, Rice plant, Isotope fractionation factor $\epsilon_{\text{transport}}$