

水稻田甲烷的减排方法研究及评价

李 晶 王明星 陈德章

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 通过对稻田甲烷排放多年的野外实验观测和对稻田甲烷排放控制因子的研究, 总结出减少稻田甲烷排放的主要方法, 对各种减排方法的减排效果和经济效益做了研究, 并利用层次分析法对各种减排方法做了进一步的评价分析。现有的稻田甲烷减排方法主要有其他肥料代替传统的有机肥、种植低甲烷排放的水稻品种, 以及稻田的灌水管理。适合中国国情的方法主要有杂交稻替代常规稻, 沼渣肥替代纯有机肥。杂交稻替代常规稻的经济效益很显著, 减少甲烷排放的同时能增加水稻的产量。沼渣肥替代有机肥的减排效果较好, 社会效益和环境效益明显优于杂交稻替代常规稻。

关键词 甲烷 减排 杂交稻 沼渣 层次分析法

1 引言

水稻是我国最主要的粮食作物, 我国人口众多, 稻谷需要量大, 中国稻作面积约为 3 300 余万公顷, 约占世界稻作总面积的 22%, 仅次于印度, 居世界第 2 位。由于我国水稻田几乎 100% 实现了灌溉化, 且大量使用有机肥料和化肥, 单位面积产量远高于印度, 与日本等发达国家相当。因此, 1990 年中国稻米的产量占世界稻米总产量的 38%, 居世界第一。中国稻田是中国最主要的 CH_4 排放源, 而且对全球大气 CH_4 也有重要贡献。

自从 70 年代末科学家发现了 CH_4 在全球温室效应中的作用后, 许多科学家在对稻田甲烷的排放量进行了观测, 也对稻田甲烷的减排方法作了大量的研究。这些研究中做得最多的是施肥对稻田甲烷排放的影响, 但由于不同地域中土壤和气候条件的不同, 这些研究至今没有得到完全一致的结论。

自从 1987 年以来陆续在中国的五大水稻产区作了稻田甲烷排放量的野外观测研究, 在四川地区的实验采用密闭箱法手动采样分析完成。在湖南地区、杭州地区、广州、苏州地区的观测均是采用密闭箱法由自动的连续采样和分析系统完成的。在整个水稻生长季, 每天 24 h 自动观测并记录数据。甲烷的产生发生于稻田土壤耕作层的还原层 (2~20 cm), 由产甲烷菌利用土壤中碳水化合物代谢过程中的产物产生的。产生的甲烷相当一部分在穿过氧化区时被氧化了, 大约只有 15%~30% 的甲烷排放入大气中。土壤中的甲烷主要通过植物体传输、气泡传输和经过土壤层的扩散向大气释放。稻田甲烷的排放有一定的规律, 其日变化有 3 种型式, 下午最大值型、夜间最大值型、下午夜间双峰型。随着水稻的生长以及反常的天气条件稻田甲烷的日变化也会随之变化。稻田甲烷的季节变化晚稻和早稻不一致, 早稻甲烷排放一般出现 3 个峰值, 晚稻一般在

水稻移栽后几日内即达到最大值, 然后随时间不断下降。近 10 年来, 我们进行了稻田甲烷排放的控制因子研究, 甲烷在土壤中产生转化机理研究, 减排方法研究以及模式研究。

2 主要减排方法

2.1 施肥

不同施肥品种对稻田甲烷排放有不同的影响, 在杭州、湖南、苏州、四川的研究结果证明。

2.1.1 化肥替代有机肥将有效地减少稻田甲烷排放

现场观测表明, 施用有机肥(植物桔杆, 动物粪便等)增加了稻田甲烷的排放, 其增加程度是受当地的土壤成分(主要是土壤中的有机物)的影响。一般情况下, 在土壤有机质含量高的土壤中(如杭州), 有机肥的施入对稻田甲烷排放的影响较小, 而在有机质含量较低的土壤中, 有机肥的施入能较大幅度地增加稻田甲烷排放。只施化肥与常规施肥比对稻田甲烷排放有一定的抑制作用。由表 1 可见, 施化肥后甲烷的排放率比没施化肥的有大幅度降低。但长期使用化肥又会对土壤及生态环境产生较大的影响。所以, 在大量使用有机肥的水稻产区施行化肥和有机肥混施的方法来减少稻田甲烷排放。

2.1.2 沼渣替代有机肥

沼渣是指有机物经沼气发酵池发酵后的剩余残渣。新鲜的有机物在沼气池中发酵后, 纤维素和半纤维素成分已经分解, 产生的 CH_4 被用来照明、取暖等, 但沼渣中的氮磷钾等成分的变化却比较小, 肥力变化不大。沼渣作为一种特殊形式的有机肥, 施入稻田后能很明显地降低稻田甲烷的排放量, 而水稻的产量基本上可以维持原状(见表 1)。但未经干燥、堆腐阶段的沼渣肥中含大量活性甲烷菌, 会使土壤中有有机物加速向甲烷转化, 因此沼渣肥施用前应经过一定时间的干燥以灭菌或降低甲烷菌的活性。沼渣是一种廉价、再生性的能源, 在我国分布较为广泛, 如取代目前常用的有机肥, 起到节能和降低甲烷排放的两种有益效能。

施肥对稻田甲烷排放的影响主要是在杭州地区(1987~1989)和湖南地区(1991~1992)进行的, 苏州、四川地区也进行了少许实验, 杭州地区施肥效用不明显, 主要原因是所有的试验田以前是用来种植茭白的, 土壤有机质含量较高。四川稻田发现施用沼渣肥能够较大幅度地降低甲烷排放, 苏州稻田发现有机肥和无机肥对甲烷的排放有很大

表 1 不同施肥品种对稻田甲烷排放率 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
和水稻产量 ($\text{kg} \cdot 100 \text{m}^{-2}$) 的影响 (湖南)

施肥品种	1991				1992			
	早稻		晚稻		早稻		晚稻	
	甲烷排放率	产量	甲烷排放率	产量	甲烷排放率	产量	甲烷排放率	产量
常规施肥	14.19	43.70	20.16	39.30	6.79	32.10 [*]	14.19	75.20
全有机肥	21.88	39.20	22.05	39.50	8.32	41.80	18.79	75.60
全化肥	4.44	38.20	6.82	39.90	3.18	44.80	3.18	67.40
沼渣肥	9.90	34.10	9.75	39.30	8.12	39.00	9.66	69.80

• 由于集中观测, 切除多株水稻, 故 1992 年早稻施常规肥田的产量值偏低

的影响,施用有机肥的稻田的甲烷排放高出施用无机肥的稻田 30%~70%。湖南地区的实验田被分为 4 块,分别以常规施肥(化肥、紫云英、稻草、有机肥与无机肥的 N、P、K 含量之比为 1:1)、有机肥(猪粪、紫云英、稻草)、化肥(复合肥、氯化钾及尿素)和沼气池中的沼渣肥,由观测结果可以看到不同施肥对甲烷排放率的影响(表 1)。

2.2 选用高产低甲烷排放的水稻品种

大量野外实地观测证明,在其他条件相同的情况下,不同水稻品种的稻田甲烷排放量有较大的差别。一般情况下,稻田甲烷排放和水稻的植物总重量成反比关系,即具有较大植物总重量的水稻品种的稻田甲烷排放较小。这是因为,较大植物总重量的水稻品种把更多的 C 固定在水稻株秆中。如在四川的稻田甲烷排放的试验中,发现具有较大植物总重量的杂交水稻品种要比常规稻品种的甲烷排放量低得多,试验田分为 4 块, I、II 块田种植 D-63 杂交稻, III、IV 块田种植 841 常规稻,每块田中要有 6 个采样

表 2 杂交稻和普通稻甲烷排放率的比较(四川)

年份	mg · m ⁻² · h ⁻¹	
	杂交稻	普通稻
1988	48.20	85.22
1989	50.74	56.71
1990	76.78	81.44
1991	67.45	80.69
1992	56.96	65.75
平均值	60.03	73.96

点,一共有 24 个采样点,稻田完全按照当地农民的常规耕作方法正常管理。在 4 个月的水稻生长期观测中,每周采样 4 次,周一、四上午 6:30~10:30 及周二、五下午 18:00~22:00,采集的样品在当天或第二天在实验室里进行分析。(表 2) 杂交稻收割前平均株高 91.2 cm,常规稻平均株高为 83.8 cm,杂交水稻的单位面积产量也比常规稻要高 30% (见表 2)。

2.3 灌水处理

水是影响稻田甲烷排放的决定性因子。通过改变稻田的灌水状态(即灌水处理),可以调节土壤的氧化还原电位状态从而控制稻田甲烷的排放。实验证明深水灌溉,间歇灌溉和常湿稻田都能减少稻田甲烷排放(见表 3)。由于灌水处理实际操作比较复杂,在湖南地区的实验中研究了 4 种不同的水管理措施对湖南地区 1992 年早稻及晚稻田甲烷排放的影响,这 4 种管理方式分别是常湿润灌溉、3 日间隔的干湿湿间歇灌溉法、常规灌溉(~3 mm)以及深灌(~10 mm)。

表 3 不同水管理对稻田甲烷排放率和水稻产量的影响(湖南, 1992)

灌水处理	早 稻		晚 稻	
	甲烷排放率 mg · m ⁻² · h ⁻¹	产量 kg · 100 m ⁻²	甲烷排放率 mg · m ⁻² · h ⁻¹	产量 kg · 100 m ⁻²
常湿润	2.88	33.0	5.50	52.80
间歇灌溉	4.54	34.10	13.62	56.70
常规水深(~3 cm)	5.20	39.40	12.12	74.90
深灌(~10 cm)	2.94	44.70	15.82	70.50

2.3.1 深水灌溉

深水灌溉是指水稻田的淹水深度高于正常的灌水深度(约为 10 cm)。在这种情况下,较深的水阻碍了厌氧环境下所产生的 CH₄ 由下至上的传输,从而减少了稻田甲烷排放。同时,深水灌溉还有利于保持土壤中的有机物,对水稻的产量也没有太大的影

响。深水灌溉对抑制早稻田中甲烷的排放效果明显，而晚稻则不然。可能是因为早稻灌溉水较充足，常规水深与之相比在土壤氧化还原电位方面差别不大，但早稻较低的气温使有较深灌溉水土壤中生成的甲烷向大气排放的效率降低。而晚稻水源不充足，深水灌溉使土壤保持较低的氧化还原电位，由于环境气温高，较深的水并没有阻止土壤中生成的甲烷向大气的传输，因此甲烷的排放率反而高。由于灌溉水的缺乏和维持水深操作的复杂，深水灌溉不是十分理想的减排方法。

2.3.2 间歇灌溉

间歇灌溉是对稻田每隔几天灌溉一次，稻田保持几天灌水和几天晒田相间隔，稻田甲烷排放有明显的减少。但稻田甲烷排放减少的同时，其他温室气体如 N₂O 的排放有所增加。

2.3.3 常湿稻田

常湿稻田是一种保持稻田中无水层但湿润的情况，这种方法对稻田甲烷排放的减排作用最大，但水稻有较大幅度的减产，因此并不可取。

2.3.4 甲烷抑制剂

通过试验发现，稻田使用液体状肥料型甲烷抑制剂，称为 AMI-AR2，不仅抑制稻田甲烷排放，而且有一定的经济效益。这种抑制剂的主要原料为一特种腐殖酸，抑制剂可以将有机质转化为腐殖质，在增加稻谷产量的同时，也减少了甲烷形成的基质。由于这种抑制剂的特点，它适用于中等和肥料条件差的稻田中。这种技术处于实验阶段。

稻田甲烷的减排技术除了以上几种以外，还有水肥结合，垄作等方法，但所有减排技术均处于研究阶段，应用还很不成熟。

3 稻田甲烷主要减排技术经济评价结果

随着我国国民经济的发展，未来有许多耕地改作其他用途，而另一方面，许多荒地将被开垦利用，成为新的耕地，一部分旱田也会因为水利设施的完善而成为水田。因此，对于我国未来的水稻面积很难加以预测。假定我国总的水稻面积不变或变化很小，单从施肥、更换水稻品种这几方面来研究稻田甲烷减排潜力及经济成本。

3.1 水稻品种改变

3.1.1 水稻品种改变的减排效果分析

根据野外观测结果，目前我国稻田甲烷排放量为 10.5~13.1 Tg/a。我国 1990 年水稻播种面积约为 3.31 × 10⁷ hm²，其中杂交稻和普通稻分别占约 30%和 70%，假定到 2010 年要求杂交稻的播种面积达到稻田面积的 60%，到 2030 年全部播种杂交稻。根据实际观测的数据，可以计算出按我们的假设到 2030 年中国稻田甲烷排放为 11.09 Tg/a，较 1990 年减少 1.49 Tg/a 即减少 11.84%（表 4）。

表 4 水稻品种改良的甲烷减排清单

年份	水稻类型	播种面积 10 ⁷ hm ²	甲烷排放率 100 g/(hm ² ·a)	甲烷排放量 Tg
1990	杂交稻	0.99	3.35	3.32
	普通稻	2.32	3.99	9.26
	总计	3.31		12.58
2010	杂交稻	1.99	3.35	6.67
	普通稻	1.32	3.99	5.27
	总计	3.31		11.94
2030	杂交稻	3.31	3.35	11.09
	普通稻	0.00	3.99	0.00
	总计	3.31		11.09

3.1.2 品种改变的减排经济成本分析

按当前的物价水平来计算, 杂交稻种子的市场价格为 1.2 元 / 500 g, 普通稻种子为 1.1~1.1 元 / 500 g。糙米为 1.2 元 / 500 g, 粳米为 1.5 元 / 500 g。由此, 可以计算出两种水稻品种不同的投入和收获 (见表 5)。

表 5 水稻品种改变的减排成本分析

水稻品种	种子投入 (元 / hm^2)	稻米价格 (元 / kg)	稻米产量 (kg / hm^2)	稻米产值 (元 / hm^2)	收 益 (元 / hm^2)	甲烷产生率 (100 g / hm^2)
杂交稻	1200	2.4	7500	18000	16800	3.35
普通稻	180	3.0	5550	16650	16470	3.99
差 值	1020	-0.6	1950	1350	330	-0.64

种植杂交稻的产量大于常规稻, 虽然目前杂交稻的价格低于常规稻, 但种植杂交稻的收益仍大于种植常规稻, 而且每生产 1 t 稻谷可减少 27.2 g 甲烷, 加上政府有关部门的大力支持, 杂交稻在许多地方得到了推广。就目前情况来讲, 种植杂交稻比种植常规稻每公顷可减少 64 g 甲烷的排放, 并可以增加 1950 kg 的水稻产量, 因此可以增加纯收入 330 元。以 1990 年的稻米价格计算, 每减排 100 g 甲烷可增加收入 515.63 元。

3.2 沼渣肥替代普通有机肥

3.2.1 沼渣肥替代普通有机肥的减排效果分析

根据野外实验, 施用沼渣肥的稻田甲烷排放率比施用普通有机肥的稻田甲烷排放率有明显的降低。目前我国大约仅有 7% 左右的稻田施用沼渣肥, 大部分稻田施用的是未经发酵的有机肥。假定到 2010 年我国有 30% 的稻田施用沼渣肥, 2030 年能有 60% 的稻田施用沼渣肥, 那么到 2030 年我国稻田甲烷的排放量将减少到 10.84 Tg / a (表 6)。

表 6 施肥品种改变的甲烷减排清单

年份	肥料品种	播种面积 / 10^7 hm^2	甲烷排放率 / $[100 \text{ g} / (\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$	甲烷排放量 / Tg
1990	沼渣肥	0.23	2.80	0.64
	普通有机肥	3.08	3.99	12.29
	总 计	3.31		12.93 [*]
2010	沼渣肥	0.99	2.80	2.77
	普通有机肥	2.32	3.99	9.26
	总 计	3.31		12.03
2030	沼渣肥	1.99	2.80	5.57
	普通有机肥	1.32	3.99	5.27
	总 计	3.31		10.84

* 不同方法估算出的稻田甲烷排放总量有一定差别

3.2.2 沼渣肥替代普通有机肥的减排成本分析

沼渣肥替代普通有机肥的减排效果明显而且可以回收利用大量能源, 不过建立沼渣池需要投入大量的资金, 因此沼渣肥的施用成本要比普通有机肥的施用成本高。目前我国的沼气池规模都比较小, 其产生的沼气基本上用来做燃气, 替代了以往的植物秸秆, 没有非常明显的作为能源补偿的效益。如果发展大型的沼气池, 集中利用沼气替代电力

和化石燃料，将有明显的经济效益（见表 7）。

表 7 施肥品种改变的减排成本分析

肥料种类	肥料投入 (元/hm ²)	稻米价格 (元/kg)	稻米产量 (kg/hm ²)	稻米产值 (元/hm ²)	收 益 (元/hm ²)	甲烷产生率 (100 g/hm ²)
沼 渣 肥	1050	2.4	7500	18000	16950	2.80
普通有机肥	150	2.4	7500	18000	17850	3.99
差 值	900	0	0	0	-900	-1.19

由表 7 可知，利用沼渣肥替代纯有机肥，每公顷可减排甲烷 119 g，而肥料投入要增加 900 元，即每减排 100 g 甲烷需增加投入 756.30 元。

4 稻田甲烷减排技术的综合评价

在对温室气体减排技术进行评价时，要考虑的因素是多方面的：包括技术特性、经济特性、局部环境特性和全球环境特性、资源的制约、社会影响等，并且要考虑到我国的具体情况和特点，才能对减排技术进行全面的评价。在所考虑的因素中，有些是可以定量分析的，有些却无法进行定量的描述，有些还是相互矛盾的，因此我们选择了专家咨询的方式，利用层次分析法进行信息处理，对不同的因素进行综合分析和评价，选择适用于我国的优先性减排技术。

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）是一种定性和定量相结合的多目标决策分析方法，可以将专家的经验给予量化，对于我们所作的减排技术评价比较适合。根据需要，对非工业源进行评价的指标分为两个层次，每一层包含一组待比较的准则，如表 8 所示。

表 8 温室气体减排技术评价层次分析法

减少温室气体排放和减轻区域环境污染等综合效益最佳						
目标层						
准则层 1	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆ A ₇
准则层 2		B ₁	C ₁	D ₁	E ₁	
		B ₂	C ₂	D ₂	E ₂	
		B ₃	C ₃		E ₃	
方案层	J ₁			J ₂	J ₃	

每层的具体指标如下：

目标层：

由于我国目前经济不十分发达，环境等问题比较严重，每一项温室气体减排技术的选择，不仅要考虑其减排的能力，而且要考虑其实施的结果对减轻区域环境污染和社会其他方面的影响，因此将综合评价的总目标定为“减少温室气体排放和减轻区域环境污染等综合效益最佳”。

准则层 1：

A₁ 为温室气体减排潜力，A₂ 为地区环境影响，A₃ 为经济性，A₄ 为社会影响，A₅ 为技术可用性，A₆ 为技术和成本数据的不确定性，A₇ 为政策对其发展的潜在有效性。

准则层 2:

B_1 为生态环境影响, B_2 为土地使用影响, B_3 为对其他温室气体排放的影响。 C_1 为投资需求量, C_2 为减排经济效益, C_3 为间接经济影响。 D_1 为国家发展目标的一致性, D_2 为间接社会影响。 E_1 为国内技术成熟程度, E_2 为进口和技术转让可能性, E_3 为应用前景和市场潜力。

方案层:

J_1 为用沼渣代替普通有机肥, J_2 为选择合适的水稻品种, J_3 为灌水管理。

按照以上的指标制成专家咨询表, 发给二十几位有关专家, 其中包括环境科学、大气科学、化学等有关方面的研究人员, 使专家根据所有知识和经验反复进行比较, 并填写比较判断表。咨询表的第一部分是对各个准则对总目标的重要性进行比较, 例如针对给定的目标专家要考虑并回答, 两个准则 A_i 和 A_j 哪一个更重要, 重要多少, 并按照 1~9 的比例标度对重要程度赋值。

咨询表的第二部分是各种减排技术进行综合打分评价。指标第一部分已经给出, 进一步给出待评价的具体技术。对要稻田甲烷的减排技术我们选取 3 种主要技术, 沼渣肥替代纯有机肥 (J_1)、水稻品种的选择 (J_2)、水管理 (J_3), 同样请有关专家给予打分, 判断对于每种指标下, 每一技术 (J_i) 与另外技术 (J_j) 的优劣进行比较, 并且按 1~9 的比例标度赋值。

表 9 各种准则 1~9 标度的含义

等级标度	相对重要性判断的含义
1	A_i 和 A_j 同等重要
3	A_i 比 A_j 略重要
5	A_i 比 A_j 较重要
7	A_i 比 A_j 非常重要
9	A_i 比 A_j 绝对重要
2, 4, 6, 8	为以上两判断之间的中间状态对应的标度值
1~9 的倒数	若 A_i 与 A_j 比较, 得到判断值为 a_{ij} , 则 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

表 10 各种减排技术 1~9 标度的含义

等级标度	相对优劣判断的含义
1	J_i 比 J_j 相同
3	J_i 比 J_j 略好
5	J_i 比 J_j 明显地好
7	J_i 比 J_j 好得多
9	与 J_i 相比 J_i 可以说是好极了
1/3	J_i 比 J_j 略差
1/5	J_i 比 J_j 明显地差
1/7	J_i 比 J_j 差得多
1/9	与 J_i 相比 J_i 可以说是差极了
2, 4, 6, 8 及其倒数	为以上两判断之间的中间状态对应的标度值

依据层次分析法的原理, 将收回的信息进行处理, 结果如下。

4.1 计算第一层准则对总目标的权重

将由专家咨询表中对准则层 1 所得的 7×7 的矩阵记为 $A = [a_{ij}]$, A 矩阵具有以下性质: 若用重量向量

$$W_A = (w_1, w_2, \dots, w_7)^T$$

右乘矩阵得到

$$AW_A = \lambda_{\max} W_A,$$

W_A 为特征向量, $\lambda_{\max}$ 为矩阵 A 唯一非零的最大特征值。

将计算出的 W_A 归一化可得各指标的相对权重。计算结果为

$$W_A = (0.299, 0.142, 0.050, 0.040, 0.096, 0.028, 0.363)^T.$$

也就是说准则层一的指标 A_1 温室气体的减排能力、 A_2 大气环境影响、 A_3 经济性、 A_4 社会影响、 A_5 技术可用性、 A_6 技术和成本数据的不确定性、 A_7 政策对其发展的潜在有效性对总目标减少温室气体排放和减轻区域环境污染等综合效益最佳的相对权重分别为 0.299, 0.142, 0.050, 0.040, 0.096, 0.028, 0.363。可见对评价减排技术来讲, 其减排潜力和政策对其发展的潜在有效性最为重要。

4.2 计算第二层准则的相对权重

将由专家咨询表中对准则层 2 所得的矩阵记为 B , 利用层次分析法的计算公式

$$W_B = B W_A$$

得到

$$W_B = (0.236, 0.049, 0.115, 0.078, 0.078, 0.006, 0.082, 0.047, 0.130, 0.052, 0.130)^T,$$

也就是说, 准则层 2 的指标 $B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, E_1, E_2, E_3$, 对总目标减少温室气体排放和减轻区域环境污染等综合效益最佳的相对权重分别为 0.236, 0.049, 0.115, 0.078, 0.078, 0.006, 0.082, 0.047, 0.130, 0.052, 0.130。

由以上计算所得的权重可以直观地看到各个指标对评价减排技术的重要程度。

4.3 计算各个减排技术对于总目标的优先顺序权重

与计算准则层 2 的权重方法相同, 将由专家咨询表中对技术方案 2 所得的矩阵记为 J 。由公式计算得到

$$W_J = (0.379, 0.403, 0.218).$$

经过检验, 所有判断的一致性指标符合判断要求

即评价的减排技术沼渣肥替代纯有机肥 (J_1)、水稻品种的选择 (J_2)、水管理 (J_3) 对于总目标减少温室气体排放和减轻区域环境污染等综合效益最佳的相对优先顺序权重为 0.379, 0.403, 0.218。

上述优先次序权重表明: 杂交稻替代常规稻, 既减少了稻田甲烷的排放又不会给生态环境带来不良影响, 并且可以增加水稻产量, 具有明显的经济效益, 其优先权重最大。沼渣肥替代有机肥, 减少甲烷排放的同时有效地利用了能源, 并减轻其他能源可能引起的环境污染, 具有良好的环境效益和社会效益, 也是很值得研究推广的技术, 其优先顺序权重排第二位。灌水管理由于对水资源的要求和可能造成水稻减产及可能增加 N_2O 排放等原因, 其优先顺序权重最小。

参 考 文 献

- 1 Cicerone, R. J. and Shetter, J. D., 1981, Source of atmospheric methane: measure in rice paddies and a discussion, *J. Geophys. Res.*, **86**, 7203~7209.
- 2 Seiler, W., A. Holzappel-Pschorn R Onrad and Scharffe, 1984, Methane emission from rice paddies, *J. Atmos. Chem.*, **1**, 241~268.
- 3 Wang Mingxing, Dai Aiguo and Shen Renxing, 1990, CH_4 emission from a Chinese rice paddy field, *Acta*

- Meteorologica Sinica*, 4, 265~275.
- 4 EPA-USA, 1990, Greenhouse Gas Emission from Agriculture system, 1990, IPCC, Responses Strategies Workshop Group, Subgroup One, Agriculture, Forestry, and Other Activities, Volume I: Summary Report, 11~13.
 - 5 IPCC, 1995, Green gas inventory reference manual, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* Volume 3, 4.46~60.
 - 6 Shutz, H., Seiler W. and Conrad R., 1989, Process involved in formation and emission of methane in rice paddies, *Biogeochemistry*, 7, 33~53.
 - 7 王明星, 1991, 大气化学, 北京: 气象出版社, 94~112.
 - 8 上官行建、王明星、沈任兴, 1993, 稻田甲烷的排放规律, 地球科学进展, 8(5), 55~62.
 - 9 陈德章、王明星, 1993, 稻田甲烷排放和土壤大气条件的关系, 地球科学进展, 8(5), 37~46.
 - 10 国家统计局农村社会经济统计司, 1992, 中国农村统计年鉴, 北京: 中国统计出版社, 95~99.
 - 11 王连芬、许树柏, 1990, 层次分析法引论, 北京: 中国人民大学出版社, 5~131.
 - 12 上官行建、王明星, 1993, 稻田CH₄排放的控制措施, 地球科学进展, 8(5), 55~62.
 - 13 Takai, Y., 1970, The mechanism of methane formation in flooded paddy soil, *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 16, 238~244.
 - 14 Sass, R. L. et al., 1990, Methane production and emission in a Texas rice field, *Global Biogeochemical Cycles*, 4, 47~68.

Studies on Mitigation Methods of Methane Emission from Rice Paddies

Li Jing, Wang Mingxing and Chen Dezhang

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

Abstract Based on the several years' experiments and the research on influencing factors, we have the major mitigation options of methane emission from rice fields. We analyzed the mitigation effect and did the cost-benefit analysis, then evaluated the mitigation options with the AHP (Analytic Hierarchy Process). At present, the major methods are biogas generator residues to substitute fresh organic fertilizers, rice cultivar selection, and water management. Using biogas generator residues to substitute fresh organic fertilizers and using the hybrid rice instead of normal rice cultivars are suitable to China. The first option can reduce methane emission significantly, and its social and environmental benefits are better than the second option. On the other hand, the economical benefit of the second one is prominent, and it can increase the rice yield.

Key words methane mitigation hybrid rice biogas residues analytic hierarchy process