

我国不同地区稻田甲烷排放量 及控制措施研究

oEB 环能— α — Δp 课题研究总结报告

摘 要 $xZZz - xZZB$ 连续 z 年在天津模拟微型小区进行了 A 组水稻对比试验 $xZZz$ 年又在武汉和广州大田上进行了两组早晚稻验证试验, 研究不同地区稻田甲烷排放通量及其控制措施, 包括 H 施用沼渣代替普通堆肥 oEp , 施用包被复合肥 oOp 、硫酸 oIp 、硝酸 oPp 代替尿素, 稻田间歇落干 oSp 以及施用氧化硅粉 Tp 等农作措施, 对减少稻田甲烷排放量的作用。每种设计措施重复 $y - z$ 年。试验结果表明: ①不施或轻施堆肥 (主要施用化肥) 的稻田甲烷排放通量中值范围为 $wuT - xz uZ$ 。天津一季稻 $wuT - x uAos$ 南方早稻 $BuT\Delta s$ 晚稻 $xz uZ$ 。 $vu o^{1/y} \cdot \varphi ps$ 可代表我国稻田一般情况。特别重施堆肥的稻田甲烷排放量中值范围分别为 $xEuEx - yEuAe$ 。 $vu o^{1/y} \cdot \varphi po$ 包括晚稻 p , 与国外报告的平均范围相当; 但重施腐熟沼渣的与单施尿素的甲烷排放通量无差异。② Γ 项设计控制甲烷的措施比同等无控制措施农作方法减少稻田甲烷排放量 $xx\% - Zao\%$ 以上, 水稻产量无显著增减。综合归纳各种设计措施减少稻田甲烷排放通量中值依次排列为: $E(Z\Delta uZ\%) \Delta O$ ($AAu o\%$) $\Delta ToAe uB\% p \Delta IIsP(Axw\%) \Delta \Sigma(zz uT\%)$ 。

关键词 稻田 甲烷排放量 堆肥 沼渣 尿素

x 前言

从1700年代开始,科学家已注意到稻田排放甲烷,1800年代以来又逐步确认甲烷也是一种具有温室效应的气体,在相同分子数量情况下,甲烷的温室效应是CO₂的25倍。当前全球大气中甲烷的平均含量约为0.000175,有每年递增0.5%—1.0%的趋势。估计全球稻田排放甲烷总量为1.5—2.0 GtC/a(范围:1.2—2.5 GtC/a),占全球甲烷排放总量的15%—20%(Xie et al., 2005)。Xie et al. 在2005年就已经提出,减少0.5%—1.0%的全球甲烷排放总量对于稳定全球大气和气候是必要的。但是,直到现在各国对稻田甲烷的研究的主要注意力仍然放在评价稻田甲烷排放量方面,对控制措施的研究比较薄弱。

我国水稻总产量占全球的 24% ，排在各国的第一位。我国水稻种植面积占全球的 33% ，次于印度，在各国排第二位。因此，我

国控制稻田甲烷排放量的研究显得十分重要和受国际的关注。

xxZzy 年本课题组对天津稻田施用 A 种沼渣(猪粪、鸡粪、人粪尿、马粪)与施用堆肥和单施化肥的大田对比试验发现, A 种沼渣因腐熟度不同, 与堆肥比较减少稻田甲烷排放通量 y %—Γx %; 与单施化肥比, 减少甲烷排放通量—xx %—BB %^{0±κ}。结果显示, 选择适宜农作措施可能具有大幅度减少稻田甲烷排放量的潜力。因此, 农业部接着批准本课题立项, 研究各种可能减少稻田甲烷排放量的农作措施。

已有的研究成果表明,稻田甲烷主要是由于土壤中有有机物质(特别是“易矿化碳”^[9A]) 在厌氧条件下,经过土壤中产甲烷菌的分解产生的。施入有机肥、含碳化肥(如尿素、碳铵)是增加甲烷产生的物质条件。甲烷产生

报告执笔人：陶 战

收稿日期: $xZZ\Delta - w\Gamma - vE$

图x 稻田甲烷产生与排放条件示意图

的土壤化学环境条件是土壤的“氧化—还原电位”($\Sigma\varphi$) 接近或低于 $-x\Delta B_1 \gamma s$ 通常在淹水下、深至 B_1 以下的土层中容易达到这种化学环境条件 见图 $x\phi$ 。

甲烷产生后, 在向上运动过程中受到土壤物质吸附、被氧化和分解的作用, 经常有 $E\omega\%$ 以上的甲烷被土壤物质吸留和进一步被甲烷氧化菌氧化分解。已有的观察证实, 水稻植株为甲烷向上运动提供了更方便的“管道”条件, 稻田排出的甲烷大部分经由了这种植株“管道”, 直接以“气泡”方式逸出的甲烷只占稻田甲烷排放量的小部分^{0Bk}。因此, 稻田甲烷排放量取决于众多的田间条件因素(如土壤有机质含量和状态、土壤氧化—还原电位、土壤的微生物营养状况、土壤中对微生物有毒性的物质含量和状态、土壤温度、土壤 Φ 值, 等等), 通过改变农作措施来改变影响甲烷产生和排放的条件, 有可能减少排放量。本课题根据同时考虑能减少稻田甲烷产生和排放、有利于水稻产量、简单易行和不增加成本的三重目标统一原则, 选择可能减少稻田甲烷排放量的农作措施进行了连续 z 年的重复对比试验。

y 材料与方法

y ω 控制甲烷措施的选择

根据上述三重目标统一的原则, 选择了 E 类处理、其中包括 Γ 类可减少甲烷排放的措

施 E 类处理为:

堆肥(重施: $yB\upsilon\varphi_1 \gamma$ 或 $y\gamma uB\upsilon\varphi_1 \gamma$; 轻施: $xy uB\upsilon\varphi_1 \gamma$, 用作对比);

沼渣(人粪、鸡粪、猪粪、马粪等 A 种, $z\tau\theta\upsilon\varphi_1 \gamma$);

尿素或磷铵(施肥量同硫铵, 用于对比);

硫铵(单施补充磷酸二氢钾; 配合堆肥施用, 总计氮素控制在 $xB\upsilon\omega\upsilon\varphi_1 \gamma$);

硝铵(同硫铵);

包被复合肥(单施或配合堆肥、磷铵, 并与之比较, 总计氮素 $xB\upsilon\omega\upsilon\varphi_1 \gamma$);

氧化硅粉(与堆肥或氮肥配合, 并与之比较, 总计氮素 $xB\omega\omega\upsilon\varphi_1 \gamma$);

间歇落干晒田(施肥量同氧化硅粉)。

y $\omega\gamma$ 供试材料

选取了 E 类供试材料, 它们的主要性状和成分见表 x 。

y ω 供试场地土壤、水稻品种和试验方案组

天津网室模拟小区供试土壤属草甸褐土, 粘壤质地, 全氮 $w\alpha\omega\Delta\%$ 全磷 $w\alpha\omega AE\%$ 全钾 $xu\Delta Z\%$, 有机质 $xu\gamma\Delta\%$, $\Phi\Delta uEZ$; 水稻品种为当地普遍使用的一季稻“津稻 ΔZ ”。武汉大田试验用土壤属黄棕壤, 中壤质地, 全氮 $w\omega\omega Ey\%$, 全磷 $w\alpha\omega Ez\%$, 全钾 $xuEZ\%$, Φ 值 $BuE\omega$; 早稻为“汕优 $\Delta\omega\gamma z$ ”, 晚稻为“汕优 ΓA ”。广州供试大田土壤属冲积土, 全氮 $w\alpha\omega Ez\%$, 有效磷 $yxuE_1\upsilon\upsilon\omega\omega$, 有效钾 $z\Gamma_1\upsilon\upsilon\omega\omega$, $\Phi B\omega$; 早稻品种为“七桂早 yB' ”, 晚稻为“粳粳 EZ ”。

$xZZE-xZZB$ 连续 z 年在天津网室模拟微型小区上进行了 A 组措施的一季稻对比试验, $xZZB$ 年在武汉和广州的大田上进行了 y 组主要措施的早晚稻对比验证试验(试验方案组见表 $x-1$)。各种设计的农作措施都有 $y-z$ 年的重复比较试验, A 种主要措施还进行了 y 组大田验证试验, 沼渣效果的大田试验已由本组在 $xZZy$ 年天津汉沽大田试验中验证过, 未包括在本次方

表 x 供试材料的性状和成分

材 料	主 要 性 状	ϑ	$\phi_y\phi_B$	有机质
		$o\text{ ‰}p$	$o\text{ ‰}p$	$o\text{ ‰}p$
堆肥 $xZZc$ 天津	购自天津西郊农家,为约等量猪粪与马粪的混合,干堆约一年,未腐熟	$xuAB$	$xuuw$	$B\Gamma uB$
$xZZA$ 天津	购自天津西郊农场,主要成分为马粪	$wuBx$	$xu\Delta x$	$Ax\text{ ‰}\Delta$
$xZZB$ 天津	购自天津西郊农场,主要成分为马粪	$wuBE$	$xu\Delta Z$	$z\Gamma\text{ ‰}Z$
$xZZB$ 武汉	选自当地农家,主要为猪粪堆积物,堆存约一年	$y uAB$	$z\text{ ‰}Bx$	$x\Gamma\text{ ‰}\Delta w$
$xZZB$ 广州	早稻鸡粪堆肥,购自广州鸡场,腐解度低	$x\text{ ‰}E\gamma$	$wuE\Gamma$	$yy\text{ ‰}\Delta z$
$xZZB$ 广州	晚稻,花肥,购自广州花卉试验场	$y uEZ$	$wu z$	$yZ\text{ ‰}\Delta\Delta$
沼渣 $xZZc$ 天津	人粪沼渣购自天津汉沽东营农家,人粪与秸秆混合发酵 x 年多	$x\text{ ‰}\gamma A$	$x\text{ ‰}\Gamma A$	$Bx\text{ ‰}A$
	鸡粪沼渣购自天津汉沽东营农家,鸡粪与秸秆混合发酵 x 年多	$x\text{ ‰}\gamma y$	$y u\Delta$	$z A u w$
	猪粪沼渣购自天津汉沽东营农家,猪粪与秸秆混合发酵 x 年多	$wu\Delta y$	$wuEZ$	$y\Delta\text{ ‰}\gamma$
	马粪沼渣购自天津汉沽东营农家,马粪与秸秆混合发酵 x 年多	$x uA$	$x uE A$	$A\Gamma\text{ ‰}Z$
尿素	商品化肥,牌号:苏联产	$A\Gamma u w$		
硫酸铵	分析纯化学试剂	$y x u w$		
硝酸铵	分析纯化学试剂	$z B u w$		
磷酸铵	化学纯试剂	$y x u w$	$B z\text{ ‰}\Delta$	
包被复合肥	北京化工大学特制,硫酸、普钙、 $\Omega I\theta s$ 聚苯乙烯包被	$E\text{ ‰}Z$	$Z u w$	$\Omega_y\phi\text{ ‰}A u B$
氧化硅粉	瑞士 $\phi\Svar\Xi\Pi$ 产品,白色粉末, $y\tau av$ 目,氧化硅含量 $ZZ\text{ ‰}Z\%$	w	w	w

表 y 间歇落干晒田对减少稻田平均甲烷排放量的效果比较

年度	试验类型	处理内容	平均 $\Pi\Phi_A$ 排放通量		间歇落干与淹灌比较	
			$\text{ ‰}v\phi\text{ ‰}^y\cdot\varphi\phi$			
			淹灌	落干	减少甲烷排放 $\%$	水稻产量增减 $\%$
$xZZc$	天津小微区*一季稻	重施堆肥+硫酸铵	$z w u \Delta A$	$y y u B$	$y E u \epsilon$	$+x\text{ ‰}\gamma$
		重施堆肥+尿素	$B \Delta u \alpha z$	$x A \text{ ‰} E$	$\Delta A u \epsilon$	$+y\text{ ‰}Z$
$xZZA$	天津微区*一季稻	轻施堆肥+磷酸铵	$\Gamma u \Delta y$	$w u Z w$	$E \Gamma u \Gamma$	$+ \Gamma \text{ ‰} E$
$xZZB$	天津微区*一季稻	重施堆肥+磷酸铵	$x w u \Gamma y$	$E u E y$	$x \Gamma \text{ ‰} Z$	$+ A \text{ ‰} B$
	广州大田早稻	尿素	$\Delta u \alpha \Delta$	$z\text{ ‰}B z$	$B w u w$	未统计
	广州大田晚稻	尿素	$x Z \text{ ‰} E E$	$x \Delta \text{ ‰}\gamma \Gamma$	$x x u w$	未统计
	武汉大田早稻	尿素	$E u E$	$B u \alpha x$	$z Z u w$	$-w u \gamma$
	武汉大田晚稻	尿素	$x x u w w$	$E u \gamma w$	$y \Gamma u w$	$+x\text{ ‰}A$

* $xZZA$ 年堆肥用量为 $xu w w$ / 微区 $o E\text{ ‰}^y p \Theta xZZc$ 年堆肥用量为 $y u w w$ / 微区 $o E\text{ ‰}^y p \Theta xZZB$ 年堆肥用量为 $z u w w$ / 微区 $o E\text{ ‰}^y p u$ 为区别起见,前者称为“轻施堆肥”、后二者称为“重施堆肥”处理,下同。

案中。

$y u A$ 田间管理

网室微区试验由课题组人员亲自管理,每日进行观察。保证处理和平行试验间田间管理的一致性。除施基肥外按计划方案追施 $y\text{—}z$ 次追肥。在施用相等氮磷肥条件下 s 施氧化硅粉的处理在水稻分蘖期至抽穗前分 B 次施入 s 每周一次,每次 $yB\text{—}z w v v\text{ ‰}^y$ 。淹灌处理自整田插秧至稻谷收割前 $x u \varphi$ 排干稻田为止,全期保持稻田有 $B\text{—}x u \alpha\text{ ‰}^1$ 水层。间歇落干晒田的处理,自分蘖期至抽穗前期止,每灌一次水后自然落干、保持干田

$x\text{—}y\rho$ 再灌水,全期落干 Δ 次。大田管理由田主在课题人员指导下按微区管理的方法操作。

$y u B$ 稻田甲烷采样和分析方法

稻田甲烷采样和测试采用国际通用的方法 ^{$\theta z\kappa$} ,包括定点定时用透明采样罩和针管抽取气样、用带火焰离子化检定器的气相色谱仪测定甲烷。在水稻插秧至收割的期间每 $z\rho$ 或 $\Gamma\rho$ 采样监测甲烷排放通量,在生长中期作一次 $y A \varphi$ 连续采样测定(每 $y \varphi$ 采样一次),根据排放通量曲线积分计算水稻全生长期的稻田甲烷排放总量。甲烷标准气样含甲烷

表≈ 稻田施用沼渣与堆肥、单施尿素对甲烷排放通量影响的比较

处理	处理主要内容*	甲烷排放通量	与处理x比减少排放通量	水稻产量
	wuB×y ¹ / ₃ 小微区	1 v /o 1 ³ •φρ	%	wu / 1 ³
x 堆肥	重施堆肥+尿素+ΩΦ _y φφ _A	AA ₁ uE ₃ **		wuΔ ₁ E ₃ **
y 尿素	尿素+尿素+ΩΦ _y φφ _A	wuΔ ₁ Δo	ZEuB	wuΔ ₁ Z ₁ A ₃
z 人粪尿沼渣	沼渣+尿素+ΩΦ _y φφ _A	y uZo	ZBuw	wuΔ ₁ ΔE ₃
A 鸡粪沼渣	沼渣+尿素+ΩΦ _y φφ _A	wuZZo	ZΔuE	wuΔ ₁ B ₁ A ₃
B 猪粪沼渣	沼渣+尿素+ΩΦ _y φφ _A	wuEyo	ZEu ₁	wuΔ ₁ A ₁ ω
Γ 马粪沼渣	沼渣+尿素+ΩΦ _y φφ _A	wuB ₁ yo	ZEuΔ	wuΔ ₁ E ₁ ξ

* 处理x施基肥为以猪粪为主的堆肥yyuB /φ¹/₃ o 风干重ρ,处理y施尿素AzΔuΔw /φ¹/₃ s 处理z—Γ施基肥为沼渣yyuB /φ¹/₃ o 风干重ρ。

** 数字后带不同字母者为相互差异高度显著α Δwuxp;反之不显著。

Auwxu₁ 1 3 0 v 1 3 0 s 由中国标准物质研究中心提供。

y u¹ 协作和质量控制

由于是z 个单位、z 处地方协作实施试验方案，质量控制很重要。本课题采取了以下措施：

①通过邀请两个省级站的试验参加人员办培训班，讲解本课题组在xZZy、xZZz 和xZZA 年z 年对稻田甲烷研究的经验、方法、成果及有关原理，统一研讨制定试验方案和方法；

②派出技术人员到两个省级站指导试验布置、调试气相色谱仪、进行试验过程咨询以及统一课题总结格式要求；

③统一提供标准甲烷气样和供试化肥。

z 试验结果分析

z u₁ 间歇落干晒田是控制稻田甲烷排放量的有效措施

我国劳模陈永康曾在Γw 年代发现间歇晒田是增产水稻的有用措施（所谓“三黄三黑”技术）。本试验发现，微型小区和大田试验都一致证实可有效减少甲烷的平均排放通量，在其它措施相同情况下，落干比不落干减少甲烷排放通量xΓuZ %—Ez uΔ %s 其中，在武汉和广州两处大田的早、晚稻试验中，落干比不落干减少稻田甲烷排放通量yΓu₁ %—Ez uΔ %s 水稻产量多数有增加趋

势，但无统计显著差异（见表y）。在灌溉条件良好的条件下，间歇落干将节省灌溉用水总量yB %左右，容易作为控制甲烷的有效措施加以推广。

z uy 施用腐熟度高的沼渣可使稻田甲烷排放通量控制在与单施化肥同样低的水平上

xZZy 年本课题组在天津稻田进行的试验发现施用腐熟的沼渣代替堆肥可以使稻田甲烷排放通量控制在与单施化肥（尿素）同等的低水平上。xZZz 年微区试验进一步证实了这一结论。在施用yyuB vφ¹/₃（风干重）沼渣情况下，与施用等量堆肥处理对比，A 种沼渣处理的排放通量范围为wuBZZ—yuEz 1 v v o 1³ /φρs 与单施尿素的处理无显著差异，比堆肥处理的减少甲烷排放通量ZBuw %—ZEuΔ %（见表z）。各处理间水稻产量无显著差异。因此，腐熟度高的沼渣可被推荐为既能控制稻田甲烷排放量、又有利于水稻生产的优质有机肥。

z u₁ 选择硫铵和硝铵作为水稻氮肥可比尿素显著减少稻田甲烷排放量

z 年来微区和大田对比试验显示，除广州晚稻一例无显著差异外，其它Γ 例对比试验一致证实，在同等条件下硫铵和硝铵可比尿素减少稻田甲烷排放通量xy %—BEuZ %（见表A）。硝铵已被证实在稻田条件下其所含氮素容易经过“反硝化”过程而损失，这是它被从化肥品种中淘汰的主要原因。硫铵是一种含氮量较低和有生理酸性效应的肥料，

表A 稻田施用硫铵、硝铵与尿素对甲烷排放通量影响比较

年度	处 理	甲烷排放通量 $1.0 \times 10^{-3} \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	比尿素处理减少甲烷排放通量 %	水稻产量 10^3 kg ha^{-1}
2000	小微区 重施堆肥+尿素	0.0005		4.5
	小微区 重施堆肥+硫酸铵	0.0005	100	4.5
	小微区 重施堆肥+硝铵	0.0005	100	4.5
2001	微区 轻施堆肥+尿素	0.0005		4.5
	微区 轻施堆肥+硫酸铵	0.0005	100	4.5
	微区 轻施堆肥+硝铵	0.0005	100	4.5
2002	微区 重施堆肥+尿素	0.0005		4.5
	微区 重施堆肥+硫酸铵	0.0005	100	4.5
2003	武汉大田早稻 尿素	0.0005		4.5
	武汉大田早稻 硫酸铵	0.0005	100	4.5
	武汉大田晚稻 尿素	0.0005		4.5
	武汉大田晚稻 硫酸铵	0.0005	100	4.5
	广州大田早稻 尿素	0.0005		未统计
	广州大田早稻 硫酸铵	0.0005	100	未统计
	广州大田晚稻 尿素	0.0005		未统计
	广州大田晚稻 硫酸铵	0.0005	100	未统计

表B 稻田施用包被复合肥在减少甲烷排放通量方面的效果比较

年度	处 理 内 容	平均甲烷排放通量	比尿素处理减少甲烷排放通量	稻谷产量
		$\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	%	$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 或 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$
xZZA	微区 轻施堆肥+尿素	$A_{10}A_5^*$		B_1B_0 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
	微区 轻施堆肥+包被复肥	$x_{10}x_{10}^*$	$\Delta B_{10}E$	$\Gamma_{10}A_5^*$
xZZB	微区 重施堆肥+尿素	$x_{10}B_{10}B_5^*$		$B_{10}B_5^*$
	微区 重施堆肥+包被复肥	$x_{10}A_{10}A_5^*$	$\Delta_{10}y$	$B_{10}A_5^*$
	武汉大田早稻 尿素	$E_{10}E_5^*$		$\Gamma_{10}y\Gamma_{10}0$ $\omega\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
	武汉大田早稻 包被复肥	$A_{10}Z_0$	$\Delta\Delta_{10}F$	$\Gamma_{10}E_{10}E_5^*$
	武汉大田晚稻 尿素	$x_{10}w_{10}E_5^*$		$B\Gamma A_{10}w_{10}$
	武汉大田晚稻 包被复肥	$B_{10}w_{10}$	ΔZ_{10}	$B_{10}Z_{10}w_{10}E_5^*$
	广州大田早稻 尿素	$\Delta_{10}A_5^*$		未统计
	广州大田早稻 包被复肥	$A_{10}y_{10}$	$\Delta_{10}w_{10}$	未统计
	广州大田晚稻 尿素	$x_{10}Z_{10}E_5^*$		未统计
	广州大田晚稻 包被复肥	$x_{10}B_{10}E_0$	$y_{10}w_{10}$	未统计

这是它被淘汰的主要原因。但是,本试验说明这两种肥料应可重新推荐,间或用作水稻追肥,以便控制稻田甲烷排放。

3.2.2 $\sim uA$ 施用包被复合肥可以显著减少稻田甲烷排放通量

本试验证实,北京化工大学专制的包被复合肥与尿素对比,除 $xZZB$ 年微区试验一例差异不够显著外,其它 B 例试验一致显示,这种包被复合肥可减少稻田甲烷排放通量 $yxuw\%-\Delta Bi\%$,一般还可增产稻谷 $A\%-xxiE\%$ (见表 B)。包被复合肥具有缓释

放特点,含硫铵,有抑制甲烷菌的作用,没有碳源,这是减少甲烷排放的原因。聚苯乙烯膜是用废塑料为原料制作的,有利于废塑料回收利用。

≈ 10 施用弱氧化剂“氧化硅粉”有可能减少稻田甲烷排放通量

两年在微区和小微区上进行的 z 组对比试验结果显示,在施用堆肥和氮肥的基础上,施用氧化硅粉的处理比不施用氧化硅粉处理可减少稻田甲烷通量 $zx\mu\%$ — $Flwa\%$;增产稻谷 $w-xy\%$ (表 Γ)。试验结果显示了氧化硅

表 7 施用氧化硅粉对减少稻田甲烷排放效果比较

年度	处 理 内 容	平均甲烷排放通量	氧化硅粉处理减少甲烷	稻谷产量
		$10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	%	
1999	微区 轻施堆肥+尿素	14.5		16.5
	微区 轻施堆肥+氧化硅粉	11.7	19.3	16.8
2000	微区 重施堆肥+尿素	18.3		17.8
	微区 重施堆肥+氧化硅粉	15.0	18.0	18.2
	小微区 重施堆肥+磷铵	17.5		17.5
	小微区 重施堆肥+氧化硅粉	15.0	14.3	18.5

表 8 不施、轻施与重施有机肥处理的稻田甲烷排放通量比较

施用有机肥类型	处 理 类 型	稻田甲烷排放通量范围	稻田甲烷排放通量中值
		$10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	$10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
不施有机肥	微区和小微区, 一季稻	11.4—11.7	11.5
	大田, 早稻	12.5—13.5	13.0
	大田, 晚稻	14.5—15.5	15.0
轻施有机肥*	微区, 一季稻	12.5—13.5	13.0
重施堆肥**	微区和小微区, 一季稻	15.0—16.0	15.5
	大田, 早稻	16.5—17.5	17.0
	大田, 晚稻	18.5—19.5	19.0
重施腐熟沼渣	微区, 一季稻	15.0—16.0	15.5

* 包括 1999 年微区“轻施堆肥”和“轻施堆肥+...”的各种处理, 堆肥用量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

** 包括 2000 年微区、小微区和 2000 年大田试验的“重施堆肥”及“重施堆肥+...”等处理, 堆肥用量分别为 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

粉作为稻田甲烷抑制剂的良好前景。估计氧化硅粉有改善土壤氧化还原电位的作用, 对控制甲烷和改善水稻根系生长条件都有好处。试验还初步发现在氧化硅粉同等用量下, 在堆肥施用量较小时, 氧化硅粉在控制甲烷和增产水稻方面的效果更大。这一点暗示, 施用氧化硅粉的效果可能与选择合适的用量有关, 或者说施用效果可能取决于氧化硅粉与有机肥用量的比例, 有待以后研究。

2. 不施或轻施有机肥比重施有机肥可大幅度减少稻田甲烷排放通量

由表 9 至表 11 的资料综合分析, 将各种不施有机肥、轻施有机肥、以及重施堆肥和重施沼渣处理的稻田甲烷排放通量范围和中值列于表 8。表 8 说明, 在不施或轻施有机肥($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 堆肥) 的情况下, 稻田甲烷排放通量中值为 $11.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。不施有机肥时, 南方早稻的稻田甲烷排放通量中值为 $13.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。晚稻为 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。当前我国水稻生产主要依靠化肥, 不施和轻施

有机肥的处理代表当前 20% 以上面积的稻田农作措施类型, 故本试验中不施和轻施有机肥处理的稻田甲烷排放通量中值对估计我国稻田甲烷的平均排放量有较大的参考价值。

重施堆肥情况下, 稻田甲烷排放通量较高, 其中值分别为: 天津一季稻 $15.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 南方早稻 $17.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 南方晚稻 $19.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。但是, 重施腐熟沼渣处理的稻田甲烷排放通量中值仅为 $15.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。农村普通堆肥一般腐熟程度低, 是造成稻田甲烷排放量高的原因。本试验的重施有机肥的设计用量($20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 过分高, 只代表我国个别极端施肥情况。结果说明即使在极端重施有机肥情况下, 我国稻田甲烷排放通量中值也在 $17.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下, 未超过国外报告的高限值。

A 结论和问题讨论

A.1 结论

Auxw 通过连续 z 年 Γ 组试验发现, 不施或轻施堆肥的稻田甲烷排放通量中值范围为 $widT-xz\text{ }uZ\text{ }vvo\text{ }^y\cdot\varphi ps$ 其中, 天津一季稻田 $widT-x\text{ }i\Delta us$ 南方早稻田 $Bid\Delta s$ 晚稻田 $xz\text{ }uZ\text{ }vvo\text{ }^y\cdot\varphi p$ 。以施化肥为主, 不施或轻施有机肥, 可代表我国当前 $Zw\%$ 的稻田施肥习惯, 这对评价我国稻田甲烷平均排放量有较大参考价值。在特别重施堆肥情况下, 一季稻、早稻和晚稻田甲烷排放通量中值分别为 $xEuEx\text{ }xEuB$ 和 $yBuAy\text{ }vvo\text{ }^y\cdot\varphi ps$ 代表个别极端重施有机肥情况, 甲烷排放量也未超过国外平均范围高限。

Auxuy 本试验选择的 Γ 项控制稻田甲烷的措施, 在 z 年、 Γ 组效果对比试验中得到了证实, 减少甲烷排放通量达 $xx\%$ — $Zw\%$, 水稻有增产或无显著减产。相对比较而言, 这些措施减少稻田甲烷排放量的效果(减少稻田甲烷排放通量 $\%$ 中值) 依次排列为: 沼渣($Z\Delta iZ\%$) Δ 包被复合肥($AAuv\%$) Δ 氧化硅粉($Az\text{ }iB\%$) Δ 硫酸铵, 硝铵($Axw\%$) Δ 间歇落干晒田($zz\text{ }u\%$) s 其中, 施用沼渣代替普通堆肥和间歇落干晒田两项措施比较容易推广。包被复合肥是本试验中特别设计制造的, 尚未投产; 硫酸铵和硝铵现时已从商品化肥中淘汰; 氧化硅粉是从国外引进试用的, 这些措施的推广应用需要解决这些材料的工业化生产问题。只要材料可得, 在农业上应用很简便, 推广很容易。

Auy 问题讨论

Auyw 氧化硅粉由于引进数量限制, 本试验只进行了微区施用试验, 未作大田验证试验, 有待多引进或国产化后经过大田应用验证才能作出可靠结论。

Auyuy 广州供试稻田(大田) 属于高肥力田, 土壤有机质含量达 $z\text{ }uyB\%$ s 全氮含量达 $x\text{ }iEz\%$ (比较: 天津供试微区土壤有机质 $x\text{ }uy\Delta\%$ s 全氮 $wuaw\Delta\%$ Θ 武汉供试稻田土壤有机质 $y\text{ }uB\%$ s 全氮 $wuEy\%$)。广州早稻田施用了湿度大、难以布施均匀的鸡粪堆肥, 致使

平行采样点间甲烷测定结果的偏差较大, 这可能是控制甲烷措施间甲烷排放通量测定结果与武汉和天津的结果趋势相同、但处理间差异不够显著的原因。另外因土壤较肥、施肥设计用量高, 水稻后期倒伏, 未能计产。

Auyw 本试验在天津采用 $y\times A\text{ }^y$ 的模拟微型小区, 四边有水泥衬砌的墙体。这种微区的试验结果与 $xZZy$ 年在天津进行的大田试验结果有较好的相似性。由于面积小, 容易进行小区间匀土处理, 也容易做到田间管理措施的同一性, 可以得到较好模拟大田和比大田更精确的对比试验结果, 可以推荐为一种较节省、能有效模拟大田的供试场地。

参 考 文 献

$x\text{ }Xf\text{ }III\text{ }uIX\text{ }^i\text{ }s\text{ } \Pi\varphi\text{ }^2\text{ }v\text{ }s\text{ }u\text{ }a\text{ } \varphi s\text{ } s\text{ }^9\text{ }4\text{ }s\text{ }^1\text{ }s\text{ }^2\text{ }s\text{ }^8\text{ }^4\text{ }s\text{ }^3\text{ } \varphi s\text{ }^1\text{ }3\text{ }6\text{ }8\text{ }^8\text{ }^3$
 $s\text{ } \varphi s\text{ } Xf\text{ } III\text{ } s\text{ } \pi\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } s\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } \Xi\text{ }^7\text{ } s\text{ }^7\text{ }^1\text{ }^1\text{ }^2\text{ } s\text{ } u\text{ } \delta\text{ } \Phi\text{ } \phi\text{ } v\text{ } \beta\text{ } \vartheta\text{ } \Sigma\text{ } \phi\text{ } u$
 $\delta\text{ }^8\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^2\text{ } \varrho\text{ } a\text{ } s\text{ }^8\text{ } \xi\text{ }^9\text{ } w\text{ } s\text{ }^2\text{ } \psi\text{ } u\text{ } xZZy$
 $y\text{ } \beta\text{ } s\text{ } \Sigma\text{ } \phi\text{ } \Xi\text{ } u\text{ }^9\text{ } s\text{ }^2\text{ } \varphi\text{ }^3\text{ }^9\text{ }^7\text{ }^s\text{ } \Upsilon\text{ }^7\text{ } \Sigma\text{ }^1\text{ } \chi\text{ }^7\text{ } \chi\text{ }^2\text{ }^7\text{ } T\text{ }^6\text{ }^3\text{ }^1\text{ } \Xi\text{ } v\text{ }^6\text{ } \chi\text{ }^7\text{ }^9\text{ }^8\text{ }^9\text{ }^6\text{ } \xi\text{ }^9$
 $s\text{ }^3\text{ }^7\text{ }^8\text{ }^s\text{ }^1\text{ }^7\text{ }^7\text{ } u\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^0\text{ } u\text{ } -s\text{ }^9\text{ }^1\text{ }^1\text{ } \xi\text{ }^6\text{ }^3\text{ } \varrho\text{ } s\text{ }^1\text{ }^3\text{ }^6\text{ }^8\text{ } u\text{ }^6\text{ } \phi\text{ } III\text{ } -\varrho\text{ } s\text{ } \delta\text{ } \Upsilon\text{ } -$
 $\Xi T\text{ } \phi\text{ } s\text{ } H\text{ } \phi\text{ }^3\text{ } \pi\text{ } s\text{ }^2\text{ } \varrho\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } v\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^7\text{ } s\text{ } \varphi s\text{ } \delta\text{ }^3\text{ }^6\text{ } \omega\text{ } \varphi\text{ } s\text{ }^4\text{ }^3\text{ }^2\text{ } \Upsilon\text{ }^6\text{ } s\text{ }^2\text{ } \varphi\text{ }^3\text{ }^9\text{ }^7\text{ }^s$
 $\Upsilon\text{ }^7\text{ } \Sigma\text{ }^1\text{ } \chi\text{ }^7\text{ } \chi\text{ }^2\text{ }^7\text{ } T\text{ }^6\text{ }^3\text{ }^1\text{ } \Xi\text{ } v\text{ }^6\text{ } \chi\text{ }^7\text{ }^9\text{ }^8\text{ }^9\text{ }^6\text{ } s\text{ } u\text{ } ZEZ\text{ } H-yu$
 z 陶 战等 u 不同施肥处理的一季稻田甲烷排放量的研究 u 农业环境保护, $xZZz\text{ } \Theta\text{ } x\text{ } y\text{ } B\text{ } p\text{ } H\text{ } Zz-x\text{ } Z\Delta$
 $A\text{ } \zeta\text{ } \xi\text{ } v\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } \Omega\text{ } s\text{ }^9\text{ } u\text{ } \Sigma\text{ } \tau\text{ } s\text{ }^8\text{ }^3\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^6\text{ } v\text{ } \xi\text{ }^2\text{ } \chi\text{ }^1\text{ } \xi\text{ }^8\text{ }^8\text{ }^s\text{ }^6\text{ } \xi\text{ }^1\text{ }^4\text{ }^9\text{ } \chi\text{ }^7\text{ }^8\text{ }^9\text{ }^6\text{ }^3\text{ }^2\text{ }^3\text{ }^2$
 $^1\text{ } s\text{ } \varphi\text{ }^2\text{ }^2\text{ } s\text{ }^1\text{ } \chi\text{ }^7\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^2\text{ } T\text{ }^6\text{ }^3\text{ }^1\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^1\text{ } s\text{ } \mathbb{V}\text{ }^4\text{ } \xi\text{ }^2\text{ } s\text{ }^2\text{ } s\text{ }^4\text{ } \xi\text{ } \rho\text{ }^3\text{ }^3\text{ } \tau\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } \rho\text{ }^7\text{ } u$
 $s\text{ }^3\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } s\text{ } \pi\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } \phi\text{ }^3\text{ }^2\text{ }^8\text{ } \vartheta\text{ }^9\text{ }^8\text{ }^6\text{ } s\text{ } xZZz\text{ } \Theta\text{ } z\text{ } \Gamma\text{ } b\text{ } Ap\text{ } HBZZ-\Gamma\text{ } \pi v$
 $B\text{ } \Phi\text{ }^3\text{ }^6\text{ }^1\text{ } \xi\text{ }^1\text{ } \tau\text{ } s\text{ } -\phi\text{ }^7\text{ } \pi\text{ } \varphi\text{ }^3\text{ }^6\text{ }^2\text{ } \Xi\text{ } s\text{ } \xi\text{ }^9\text{ } u\text{ }^1\text{ } s\text{ } \varphi\text{ }^2\text{ }^2\text{ } s\text{ }^2\text{ } s\text{ }^1\text{ } \chi\text{ }^7\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^2\text{ } \rho\text{ }^9\text{ }^6\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } v$
 $\xi\text{ } \pi\text{ }^9\text{ }^8\text{ }^6\text{ } \chi\text{ }^7\text{ }^8\text{ }^9\text{ }^6\text{ }^3\text{ }^2\text{ }^4\text{ } s\text{ }^6\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } \rho\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^1\text{ }^7\text{ }^3\text{ }^2\text{ } X\text{ }^7\text{ }^8\text{ }^9\text{ }^6\text{ }^3\text{ }^2\text{ }^4\text{ } \chi\text{ }^2\text{ } s\text{ }^4\text{ } \xi\text{ } \rho\text{ }^3\text{ }^3\text{ } u\text{ } \Psi\text{ } \Upsilon\text{ } s\text{ }^3\text{ } -$
 $^4\text{ } \varphi\text{ }^3\text{ }^7\text{ }^9\text{ } \varrho\text{ } s\text{ }^1\text{ } s\text{ } xZET\text{ } \Theta\text{ } x\text{ } H\text{ } x\text{ } B\text{ } x\text{ } -x\text{ } x\text{ } ExA$

作者简介

陶 战, 研究员 $xZZy$ 年开始从事农业环境研究, 主要研究领域有土壤污染和农区生物多样性保护。主要著作有《农业环境学》、《中国农业部门生物多样性保护行动计划》等。 $xZZx$ 年开始开展稻田甲烷研究, 发表论文有“不同施肥处理的一季稻田甲烷排放量研究”、“沼渣对稻田甲烷排放量的影响”、“稻田施用沼渣对甲烷排放通量的影响”等。

EB 环能— $u\text{ }x$ — $u\text{ } \Delta$ 课题组成员

农业部环境保护科研监测所H	陶 战	杜道灯	刘萧威
	买光熙	周 毅	
湖北农业生态环境保护站H	林匡飞	李秋洪	项雅玲
	姜达丙	刘雪峰	胡球兰
	吴佐礼		
广东省农业环境监测站H	黎南华	赵 苹	成淦荣
	欧计寅	郑崇德	郑 武
	谢小丽	梁金丽	江怡逢