《水稻高产减排节水灌溉技术规程》(征求意见稿)
编制说明

一、目的意义

1.1 简述产业发展现状

目前美国、欧洲等农业发达国家尚无稻田水分管理与甲烷（CH_4）减排构建技术的标准。登录全国农业食品标准公共服务平台，分别以“稻田减排”、“稻田甲烷”、“水稻节水灌溉”、“水稻减排节水灌溉”和“水稻高产减排节水灌溉”作为检索关键词对项目进行查新，检索结果表明，目前仅有 1 项关于“水稻节水灌溉”的江苏省地方标准（DB 32/T 2950-2016）。该标准适用于农田灌排工程体系较为完备的移栽水稻灌溉，主要是规定了水程节水灌溉技术的术语和定义、江苏省水稻灌溉分区和适宜节水灌溉模式、水稻节水灌溉技术操作要点。该标准主要是针对江苏省移栽水稻不同灌溉区（淮北片、沿海片、沿江片、太湖片、宁镇扬片、里下河片）的气象条件、土壤类型特征提出的综合灌溉用水定额和本田期灌溉技术及灌水指标，但并未涉及稻田灌溉技术减排 CH_4 的技术要求，而水分管理对于水稻的产量形成和 CH_4 排放的调控尤为重要。因此，亟需出台相关技术规程标准予以规范引导。

1.2 制定团体标准的必要性

我国是最大的水稻生产国，水稻生产对于我国乃至世界的粮食安全具有至关重要的作用。然而，水稻的种植也产生了大量的温室气体尤其是甲烷（CH_4），据估算我国每年因种植水稻所排放的 CH_4 高达 1.9 亿吨 CO_2 当量，占我国农业源温室气体排放总量的 24%。因此，在确保粮食安全的前提下，制定合理的农田管理措施来有效减少我国稻田 CH_4 的排放，对于完成我国国民经济和社会发展第十四个五年规划和实现我国“碳达峰与碳中和”的战略目标具有重要意义。

同时，水稻是用水量最大的作物，其灌溉水量约占亚洲农业用水的 80%。我国近年稻田灌溉用水量约占全国总用水量的 1/3，占农业用水的 70%。如何在增加水稻产量的同时减少使用宝贵的水资源？这是农业生产面临的一个巨大挑战。本项目提出的水稻高产减排节水灌溉技术规程，对水稻种植过程中水分管

理提高产量和减少甲烷排放的技术术语、定义、基本原则、要求和方法均做出了技术规范。本标准推荐技术适合在我国水稻主产区推广应用，可为“双碳”目标下保障国家粮食安全和农业绿色提供技术支撑。

1.3 制定团体标准的可行性

在水稻高产节水灌溉中，确定合适的灌溉指标是节水技术的关键。以往大多的水稻灌溉技术指标一般以灌水深度、地下水位埋深、土壤含水量、田间持水量的百分率等作为灌溉的指标。用上述方法指导灌溉，至少有两点不足之处：一是这些指标测定速度慢或精度差（如酒精燃土法等），难以监测瞬时的土壤水分状况，因而精确度难以保证；二是以土壤含水量作为指标，其生理效应因土壤质地不同而有较大差异。用田间持水量作指标，局限性就更大，因为田间持水量既不是一个常数，也不是一个精确数值，是土壤水分在再分配过程中，向下流动速率显著减慢时土壤中所能保持的水量。为了克服上述缺点，本项目组于 20 世纪 90 年代初将土壤水分能量概念—土壤水势作为灌溉指标，并用土壤水分张力计测定土壤水势，以此指导灌溉，建立了分生育期控制低限土水势的水稻干湿交替灌溉技术。用土壤水势作指标有许多优点：①提供了便捷、精确的测定土壤水分的方法，提高了与土壤水分有关的农艺试验研究的准确性和精度；②受土壤类型的局限性小，不论是砂土还是粘土，只要土壤水势一样，植物根对土壤水分的有效性就一样，因而用土壤水势作为灌溉指标，具有普遍的指导意义；③使灌溉技术数量化、指标化和实用化；④可用统一尺度来研究分析土壤-植物-大气连续体中水的运行及其相互关系，因而可深入研究水稻生产中的有关水分生理问题。生产试验证明，用土壤水势作为灌溉指标，精确度高、可靠性好。

起草单位扬州大学杨建昌教授团队长期从事作物水分生理和水稻节水灌溉理论与技术的研究，建立了以控制低限土壤水分为核心的水稻旱育壮秧水分管理技术、全生育期轻干湿交替灌溉技术、控制式畦沟灌溉技术、覆草旱种技术、花后适度土壤干旱技术等，形成了适合于不同稻作条件的高产节水灌溉技术体系，并阐明了水稻高产与水分高效利用的机理。建立的水稻高产节水灌溉技术在苏、皖、赣、鲁、粤、黑、沪等省（市）示范应用，取得了十分显著的节水、

增产和水分高效利用的效果，并可改善稻米品质，减少稻田甲烷等温室气体的排放。同时，团队研发的“一种依据土壤水势和水稻品种类型追施氮肥的方法”获国家授权发明专利。研究成果“水稻高产与水分养分高效利用栽培技术的研究与应用”获教育部科技进步奖一等奖；以适度土壤干旱促进同化物转运和籽粒灌浆为重要内容的研究成果“促进稻麦同化物向籽粒转运和籽粒灌浆的调控途径与生理机制”获国家自然科学奖二等奖。目前，研发团队成员主持在研国家重点研发计划项目课题 1 项、国家自然科学基金 13 项、江苏省重点研发计划项目 1 项，为该技术标准的组织、实施、试验研究及示范推广提供了充足的经费支持。

1.4 预期经济社会效益分析

本标准的研究符合国家“碳达峰与碳中和”重大战略需求，对于实现我国稻田温室气体减排具有很好的支撑作用。本标准涉及的干湿交替灌溉技术是目前生产中应用最广泛的一种节水灌溉方式，已在中国、印度、菲律宾、孟加拉国、越南等多个国家推广应用，取得了明显的增产和节水效果。标准的社会和经济效益主要通过提高水稻产量和降低农业生产成本体现，在水稻大田生产中，采用本标准制定的以干湿交替灌溉为核心技术的水稻高产减排节水灌溉技术，与常规水层灌溉相比，预期产量可以提高 5%～8%，灌溉水量减少 20%～40%，灌溉水生产力提高 30%～40%，节省灌溉费用 6～8 元/亩。标准的生态环境效益主要通过降低稻田温室气体向环境的排放体现，与常规水层灌溉相比，采用本标准制定的以干湿交替灌溉为核心技术的水稻高产减排节水灌溉技术，稻田的 CH_4 排放量可以降低 52%～65%。同时本标准也具有显著的公益特征，可以产生良好的社会经济和生态环境效益，能够得到国家、社会各界和国际社会的广泛支持。

二、任务来源

根据 2023 年 5 月 30 日江苏省农学会下达的关于征集 2023 年江苏省农学会团体标准（第二批）立项项目的通知，标准牵头单位向江苏省农学会提交立项

申请。

三、编制过程（需根据标准制定程序各阶段的进展不断补充，直到可发布为止）

本单位标准实施计划：

2023 年 8 月-9 月：标准的编制与完善。

2023 年 9 月-2024 年 3 月：根据标准草案，针对关键技术环节开展大范围实证性试验示范。

2024 年 4 月-6 月：开展标准体系的论证咨询和进一步完善。

2024 年 6 月以后：针对省内与水稻种植业管理部门、农业企业、农业专业化合作组织，开展标准的宣传和培训，推动标准的贯彻实施。

四、主要内容技术指标确立

以籼稻品种扬稻 6 号和粳稻品种武育粳 24 号为材料，分别在分蘖早期（栽后 7 天至再后 15 天）、分蘖中期（栽后 15 天至有效分蘖临界叶龄期）、分蘖后期（有效分蘖临界叶龄期至开始拔节）、拔节穗分化期（开始拔节至孕穗）、孕穗抽穗期（自孕穗至穗全部抽出）、灌浆前中期（自穗全部抽出至抽穗后 20 天）和灌浆后期（自抽穗后 21 天至收割），在有遮雨设施的大田或土培池设置不同土壤水分（土壤容积含水量、土壤埋水深度、土壤水势）处理，观察土壤水分与产量的关系。

研究表明，采用轻干湿交替灌溉技术，可较常规灌溉增产 6.4%～11.7%，灌溉水生产力（产量/灌溉水量）提高 53%～64%（表 1）。土壤水分（X）与产量（Y）的关系均呈如图 1 所示的开口向下的抛物线关系：$Y=y_0+aX+bX^2$（公式中 y_0 为矫正值，a 和 b 为方程参数）。对方程求导，可获得各生育期最适的土壤水分（X_{opt},获得最高产量的土壤含水量、土壤埋水深度、土壤水势）。各生育期土壤水分与产量的回归方程和最适土壤水分列于表 2 和 3。从表可知，不同生育期水稻对土壤水分的响应存在差异，获得最高产量的最适的土壤水分指标不同。在各生育期中，分蘖早期和孕穗抽穗期对土壤响应较为敏感，获得最

高产量的土壤落干程度较轻，即土壤含水量和土壤水势较高，土壤埋水深度较浅；分蘖后期、拔节穗分化期和灌浆后期对土壤水分响应较为钝感，或土壤落干的程度可较重，即土壤含水量和土壤水势较低，土壤埋水深度较深；分蘖中期和灌浆前中期获得最高产量的土壤落干程度，较分蘖早期和孕穗抽穗期重，较分蘖后期、拔节穗分化期和灌浆后期轻。在相同生育期，以砂土获得最高产量的土壤水分最高，其次为壤土，粘土的土壤水分最低（表 2 和表 3）。研究还发现，与保持水层（土壤水势为 0 kPa）相比，全生育期采用重干湿交替灌溉（土壤自然落干到土壤水势为-25 kPa 时再灌溉）后，杂交籼稻、杂交粳稻、常规籼稻和常规粳稻的减产率分别为 4.15%、8.25%、8.21%和 10.25%（图 2）。表明在上述 3 类品种中，常规粳稻对土壤水分响应最为敏感，或抗旱性最弱，其次为常规籼稻和杂交粳稻，杂交籼稻适应低土壤水分的能力最强。

表 1 干湿交替灌溉对水稻产量和灌溉水利用效率的影响

品种	灌溉方式	产量（t/hm^2）	灌溉用水量		灌溉水生产力	
			mm	%	Kg/m^3	%
扬辐粳 8 号	常规灌溉	8.14 b	926 a	100	0.88 c	100
	轻干湿交替灌溉	8.96 a	665 b	72	1.35 a	153
	重干湿交替灌溉	5.28 c	476 c	51	1.11 b	126
扬稻 6 号	常规灌溉	8.52 b	935 a	100	0.89 b	100
	轻干湿交替灌溉	9.52 a	678 b	73	1.40 a	157
	重干湿交替灌溉	6.09 c	469 c	50	1.30 a	146
扬粳 4038	常规灌溉	9.27 b	869 a	100	1.07 c	100
	轻干湿交替灌溉	9.86 a	657 b	76	1.76 a	164
	重干湿交替灌溉	7.29 c	483 c	56	1.51 b	141

常规灌溉：生育中期搁田，其余时间水层灌溉；轻干湿交替灌溉：从浅水层自然落干至离地表 15-20 cm 处土壤水势为-10~-15 kPa 时再灌水：重干湿交替灌溉：从浅水层自然落干至离地表 15-20 cm 处土壤水势为-25~-30 kPa 时再灌水；灌溉水生产力=产量(kg)/灌溉用水量(m^3)；不同字母表示在 0.05 水平上差异显著，同栏、同品种内比较。

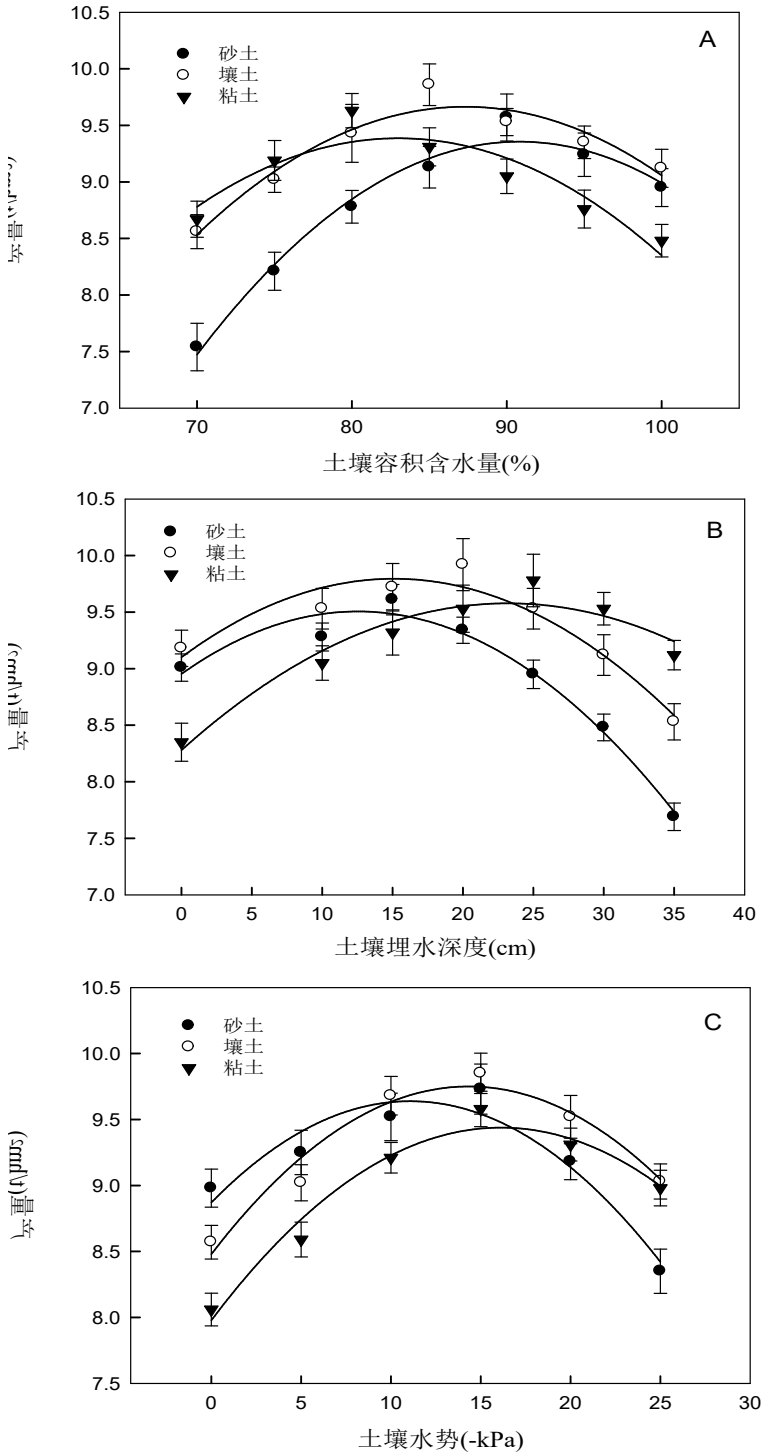

图 1 水稻分蘖中期土壤含水量(A)、土壤埋水深度(B)和土壤水势(C) 与产量的关系

图中数据为扬稻 6 号和武运粳 24 号两个品种的平均值。

表 2 移栽水稻生育前中期土壤水分(X)与产量(Y)的关系及最适土壤水分指标(X_{opt})

生育期	土壤类型	土壤容积含水量(%)			土壤埋水深度 (离地表 cm)			离地表 15-20 cm 处土壤水势(-kPa)		
		回归方程	R^2	X_{opt}	回归方程	R^2	X_{opt}	回归方程	R^2	X_{opt}
分蘖前期 (栽后 8 天至再后 15 天)	砂土	$Y=-28.15+0.789X-0.0041X^2$	0.95**	96.2	$Y=9.01+0.085X-0.0041X^2$	0.98**	10.4	$Y=9.03+0.076X-0.0044X^2$	0.96**	8.63
	壤土	$Y=-35.04+0.967X-0.0052X^2$	0.92**	93.0	$Y=9.15+0.092X-0.0033X^2$	0.89**	13.9	$Y=9.17+0.073X-0.0040X^2$	0.87**	9.12
	粘土	$Y=-26.54+0.834X-0.0048X^2$	0.91**	86.9	$Y=8.93+0.10X-0.0026X^2$	0.86**	19.2	$Y=8.75+0.115X-0.0048X^2$	0.92**	12.0
分蘖中期 (栽后 16 天至有效分蘖临界叶龄期)	砂土	$Y=-26.46+0.789X-0.0043X^2$	0.98**	91.7	$Y=8.95+0.088X-0.0035X^2$	0.97**	12.6	$Y=8.87+0.139X-0.0063X^2$	0.96**	11.1
	壤土	$Y=-19.08+0.659X-0.0038X^2$	0.93**	86.7	$Y=9.10+0.092X-0.0030X^2$	0.93**	15.3	$Y=8.48+0.177X-0.0062X^2$	0.95**	14.3
	粘土	$Y=-15.32+0.595X-0.0036X^2$	0.85**	82.6	$Y=8.28+0.112X-0.0024X^2$	0.97**	23.3	$Y=7.98+0.181X-0.0056X^2$	0.96**	16.2
分蘖后期 (有效分蘖临界叶龄期至开始拔节)	砂土	$Y=-23.66+0.76X-0.0043X^2$	0.99**	88.4	$Y=8.35+0.133X-0.0035X^2$	0.94**	19.0	$Y=8.79+0.085X-0.0023X^2$	0.81**	18.5
	壤土	$Y=-15.88+0.609X-0.0036X^2$	0.95**	84.6	$Y=8.40+0.123X-0.0025X^2$	0.89**	24.6	$Y=8.87+0.098X-0.0025X^2$	0.87**	19.6
	粘土	$Y=-0.80+0.446X-0.0028X^2$	0.82**	79.6	$Y=8.39+0.084X-0.0014X^2$	0.88**	30.0	$Y=8.42+0.102X-0.0023X^2$	0.91**	22.2
拔节穗分化期 (开始拔节至孕穗)	砂土	$Y=-27.50+0.818X-0.0045X^2$	0.93**	90.9	$Y=9.02+0.075X-0.0037X^2$	0.99**	10.1	$Y=9.03+0.084X-0.0047X^2$	0.98**	8.94
	壤土	$Y=-28.70+0.897X-0.0052X^2$	0.94**	86.3	$Y=9.16+0.087X-0.0031X^2$	0.95**	14.2	$Y=9.28+0.081X-0.0044X^2$	0.93**	9.21
	粘土	$Y=-19.86+0.72X-0.0044X^2$	0.92**	81.8	$Y=8.39+0.111X-0.0029X^2$	0.85**	19.1	$Y=8.77+0.114X-0.0045X^2$	0.92**	12.7

表中数据为扬稻 6 号和武运粳 24 号两个品种的平均值；Y, 产量 (t/hm^2)；X，土壤水分(土壤容积含水量、土壤埋水深度、土壤水势); R^2，回归方程决定系数；**，在 P=0.01 水平上差异显著；X_{opt}，可获得最高产量的土壤水分。

表 3 移栽水稻生育中后期土壤水分(X)与产量(Y)的关系及最适土壤水分指标(X_{opt})

生育期	土壤类型	土壤容积含水量(%)			土壤埋水深度 (离地表 cm)			离地表 15-20 cm 处土壤水势(-kPa)		
		回归方程	R^2	X_{opt}	回归方程	R^2	X_{opt}	回归方程	R^2	X_{opt}
孕穗抽穗期(自孕穗至穗全部抽出)	砂土	$Y=-22.84+0.658X-0.0033X^2$	0.98**	99.7	$Y=9.16+0.058X-0.0039X^2$	0.94**	7.41	$Y=9.34+0.031X-0.0046X^2$	0.98**	3.37
	壤土	$Y=-22.14+0.657X-0.0034X^2$	0.97**	96.6	$Y=9.11+0.093X-0.0050X^2$	0.98**	9.30	$Y=9.53+0.044X-0.0048X^2$	0.97**	4.54
	粘土	$Y=-16.79+0.553X-0.0029X^2$	0.96**	95.3	$Y=8.78+0.104X-0.0045X^2$	0.97**	11.6	$Y=9.08+0.107X-0.0065X^2$	0.98**	8.23
灌浆前、中期(自穗全部抽出至抽穗后 20 天)	砂土	$Y=-27.53+0.776X-0.0041X^2$	0.96**	94.6	$Y=9.05+0.081X-0.0039X^2$	0.98**	10.4	$Y=9.18+0.058X-0.0035X^2$	0.95**	8.29
	壤土	$Y=-45.62+1.221X-0.0067X^2$	0.94**	91.1	$Y=9.10+0.102X-0.0041X^2$	0.97**	12.5	$Y=9.22+0.097X-0.0049X^2$	0.92**	9.89
	粘土	$Y=-32.03+0.669X-0.0056X^2$	0.95**	86.3	$Y=8.35+0.122X-0.0034X^2$	0.88**	17.9	$Y=8.77+0.129X-0.0052X^2$	0.92**	12.4
灌浆后期(自抽穗后 21 天至收割)	砂土	$Y=-36.6+1.024X-0.0057X^2$	0.99**	89.8	$Y=8.62+0.133X-0.0059X^2$	0.98**	11.3	$Y=8.79+0.102X-0.0040X^2$	0.94**	12.8
	壤土	$Y=-24.27+0.809X-0.0048X^2$	0.97**	84.3	$Y=8.95+0.108X-0.0035X^2$	0.91**	15.4	$Y=9.01+0.097X-0.0034X^2$	0.88**	14.3
	粘土	$Y=-19.55+0.723X-0.0045X^2$	0.91**	80.3	$Y=8.19+0.116X-0.0027X^2$	0.85**	21.5	$Y=8.42+0.142X-0.0045X^2$	0.91**	15.8

表中数据为扬稻 6 号和武运粳 24 号两个品种的平均值；Y, 产量 (t/hm^2)；X，土壤水分(土壤容积含水量、土壤埋水深度、土壤水势); R^2，回归方程决定系数；**，在 P=0.01 水平上差异显著；X_{opt}，可获得最高产量的土壤水分。

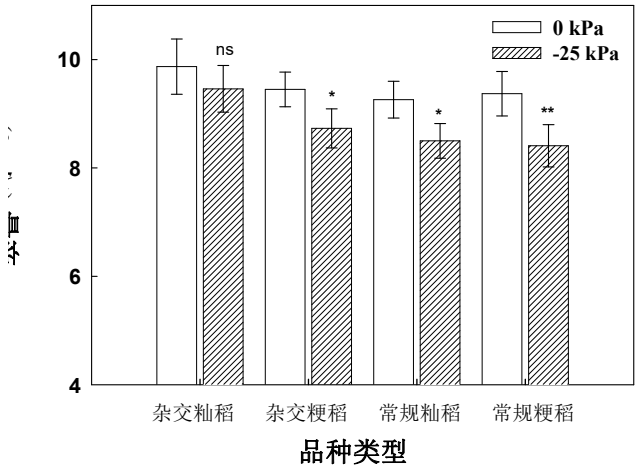

图 2 重干湿交替灌溉对不同类型水稻品种产量的影响

杂交籼稻为汕优 63、II 优 084 和扬两优 6 号 3 个品种的平均值；杂交粳稻为六优 1 号、六优 53 和陵香优 18 号 3 个品种的平均值；籼稻为扬稻 4 号、扬稻 6 号和扬辐籼 6 号 3 个品种的平均值；粳稻为连粳 7 号、淮稻 5 号和武运粳 24 号 3 个品种的平均值；0 kPa：保持水层(对照)；-25 kPa：重干湿交替灌溉，当土壤自然落干至土壤水势为-25 kPa 复水；ns: 与对照差异不显著，*：与对照差异显著；**：与对照差异极显著。

为了评价高产减排节水灌溉技术对稻田温室气体的排放的影响，以粳稻扬粳 4038 为材料并种植于大田，设置 4 种处理：常规灌溉（生育中期搁田，其余时期保持水层）、麦秸秆不还田（CI-S）；轻干湿交替灌溉（土壤自然落干至土壤水势-15 kPa 时复水）、麦秸秆不还田（WMD-S）；常规灌溉+麦秸秆还田（CI+S）；轻干湿交替灌溉+麦秸秆还田（WMD+S），观察了在不同灌溉方式和秸秆还田条件下水稻全生育期稻田甲烷和氧化亚氮排放特点。

在水稻生育前期稻田淹水情况下，所有处理的稻田甲烷排放通量均较高（图 3）。水分处理开始后，轻干湿交替灌溉小区的甲烷排放会出现几个峰谷，峰值出现在复水期，低谷出现在落干期。常规灌溉小区的甲烷排放最高峰则出现移栽后 24～25 天，在中期搁田时显著下降。各处理甲烷排放在移栽后 47-48 天再出现一个峰值，这与该时期温度较高、水稻长势较旺盛有关。此后，各处理的甲烷排放保持在一个较低的水平。轻干湿交替灌溉显著降低了甲烷排放（图 3）。

在有水层情况下，几乎监测不到氧化亚氮的排放（图 3）。在轻干湿交替灌溉的土壤落干期，以及常规灌溉的中期搁田期，氧化亚氮排放呈现出类似脉冲的波动，且只有当土壤水势低于-10 kPa 时，才能检测到氧化亚氮的排放（图 3）。说明在水稻轻干湿交替灌溉中，如果土壤落干的土壤水势指标高于-10 kPa，就不

会增加稻田氧化亚氮排放。

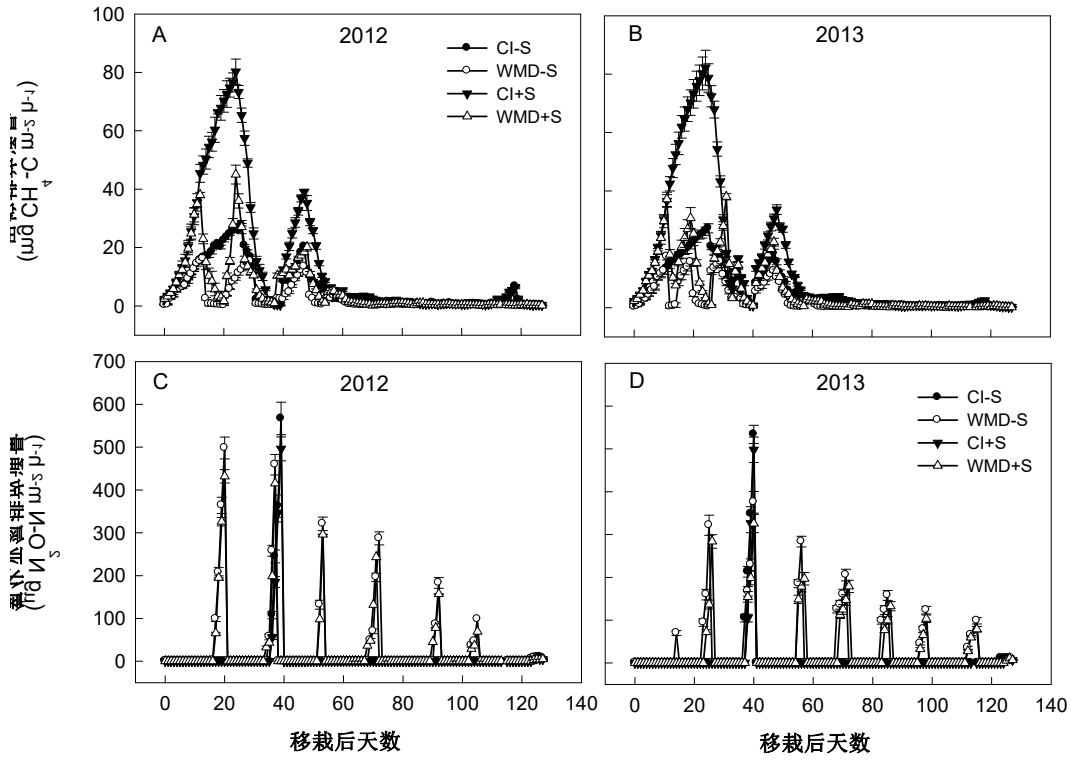

图 3 轻干湿交替灌溉对水稻生长季甲烷(A, B)和氧化亚氮(C, D)排放通量的影响

供试品种为扬粳 4038；CI：常规灌溉；WMD：轻干湿交替灌溉； -S：麦秸秆不还田； +S：麦秸秆还田。

各处理所排放的甲烷和氧化亚氮折算成全球增温潜势后，其变幅为2.3～11.4 t CO_2-eq /hm^2（表 4）。表明无论在何种处理下，稻田氧化亚氮的排放量很低，甲烷是稻田排放的主要温室气体。在轻干湿交替灌溉条件下，氧化亚氮排放的氮损失量仅占总氮量(200 kg/hm^2)的 0.36%～0.42%，说明因轻干湿交替灌溉增加氧化亚氮排放而造成氮的损失是非常小的。

综上，轻干湿交替灌溉可以较常规灌溉大幅度地降低稻田甲烷的排放，进而降低全球增温潜势和温室气体排放强度。轻干湿交替灌溉会增加氧化亚氮的排放，但稻田氧化亚氮的排放量占全球增温潜势的比例很低，因轻干湿交替灌溉增加氧化亚氮排放而造成氮的损失极小。

表 4 轻干湿交替灌溉对水稻生长季甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放、全球增温潜势和温室气体强度的影响

年/处理	甲烷 (kg CH_4-C/hm^2)	氧化亚氮 (kg N_2O-N/hm^2)	全球增温潜势 (kg CO_2 eq/hm^2)	温室气体强度 (kg CO_2 eq/kg 籽粒)
2012				
CI-S	171.4 c	0.316 c	4379 c	0.486 b
WMD-S	83.6 d	0.833 a	2338 d	0.251 c
CI+S	442.8 a	0.265 d	11149 a	1.385 a
WMD+S	186.4 b	0.718 b	4874 b	0.514 b
2013				
CI-S	177.2 c	0.298 c	4519 d	0.483 b
WMD-S	91.7 d	0.807 a	2533 b	0.266 c
CI+S	452.9 a	0.231 d	11391 a	1.391 a
WMD+S	194.6 b	0.710 b	5077 c	0.525 b

供试品种为扬粳 4038；CI：常规灌溉；WMD：轻干湿交替灌溉； -S：麦秸秆不还田； +S：麦秸秆还田；全球增温潜势= 25× CH_4 + 298 ×N_2O；温室气体强度=全球增温潜势/籽粒产量；不同字母表示在 P=0.05 水平上差异显著，同栏、同年内比较。

五、与相关法律法规和国家标准的关系

本标准的制定不违反相关法律法规及强制性标准；无相同或相似国家标准和行业标准；参考和引用的标准如下：水稻全程机械化生产技术规范（NY/T 3658-2020）、水稻机插秧作业技术规范（NY/T 2192-2012）、粮食作物种子第 1 部分 禾谷类（GB4404.1-2008）、水稻节水灌溉技术规范（DB32/T 2950-2016），此 4 项标准主要用于机械化生产技术的参考。

六、实施推广建议

本标准可广泛适用于水稻种植区域，涉及高产减排节水灌溉技术。本标准规定了水稻高产减排节水灌溉技术的土壤水势、土壤类型、土壤含水量及水稻不同生育阶段的灌溉技术要点等。

七、团体标准涉及专利的说明

无。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准为推荐性类标准，并不涉及有关国家安全、保护人体健康和人身财产安全、环境质量要求等有关强制性地方标准或强制性条文。

如遇专家分歧意见，我们将充分考虑专家意见，并积极进行协商沟通，对标准进行修改和优化，取得最佳方案。