文章编号: 1672 - 3317 (2023) 08 - 0026 - 08

基于 DNDC 模型的稻田氨挥发模拟及减排模式

毕文通1,纪仁婧1,和玉璞1*,付静1,尚明2

(1.南京水利科学研究院,南京 210029; 2.江苏省江都水利工程管理处,江苏 扬州 225200)

摘 要: 【目的】优化稻田氨挥发减排的水炭调控模式。【方法】基于田间实测数据,利用 DNDC 模型构建并验 证了水炭调控稻田氨挥发过程模拟模型,分析不同灌溉模式及生物炭添加水平对稻田氨挥发损失量的影响特征, 最终优选出稻田氨挥发减排的水炭调控模式。【结果】基于 DNDC 模型构建的水炭调控稻田氨挥发过程模拟模型 在稻田分蘖肥后 1 周、穗肥后 1 周、整个稻季的氨挥发量模拟值和实测值的相对误差均在±8%以内,能够较好地 模拟控制灌溉稻田不同生物炭添加量后土壤氨挥发损失特征。随着生物炭添加量的增加,相同灌溉处理稻田氨挥 发损失量呈小幅递减趋势;相同生物炭添加水平下,稻田氨挥发损失量随灌水下限的降低出现小幅下降。灌水和 添加生物炭均显著影响稻田氨挥发损失量,灌水处理是主要影响因素,对稻田氨挥发的作用明显强于添加生物炭。 【结论】I3B11 处理为稻田水炭调控最优模式,在降低稻田灌溉下限的基础上适当增施生物炭可以有效降低稻田 氨挥发量。

 关键词:DNDC; 氦挥发; 生物炭; 控制灌溉; 稻田

 中图分类号: S274
 文献标志码: A

 doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022603
 OSID: 副系統

毕文通,纪仁婧,和玉璞,等. 基于 DNDC 模型的稻田氨挥发模拟及减排模式[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 26-33. BI Wentong, JI Renjing, HE Yupu, et al. Using DNDC Model to Help Mitigate Ammonia Volatilization from Paddy Fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 26-33.

0引言

【研究意义】我国稻田氮肥消耗量约占世界氮肥 总消费量的 7%^[1]。我国稻田氮肥利用效率仅为 35% 左右,低于发达国家平均水平^[2-4]。稻田较低的肥料 利用率意味着大量氮素通过不同的途径流失到周边 环境,在提高农业生产成本的同时,引发了较为严重 的面源污染问题^[5-6]。氨挥发是稻田氮素的损失途径 之一,在全球农作物种植体系中,通过氨挥发损失的 氮素占总施氮量的平均比例为18%,最高可达 64%^[7]。 科学减少我国稻田氨挥发排放,并制定有效的减排措 施是目前研究热点。

【研究进展】生物炭添加已被证明具备提高土壤 固碳吸附能力、保持水分能力以及减少农田温室气体 排放等效果^[8-12]。生物炭对土壤中的氮素具有很强吸 附能力,能够有效抑制氨挥发。适量生物炭被施入稻 田可以有效降低稻田氨挥发^[8,12],控制灌溉、间歇灌 溉等水稻节水灌溉模式可以有效减少稻田氨挥发损

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

失量[13-14]。灌水量及生物炭添加量显著影响氨挥发, 灌水会加剧氨挥发,延长氨挥发时间,同一灌水量下, 氨挥发会随生物炭量的增加呈先降低后增加的趋势[15]。 由于田间试验的工作量大、周期长、环境因素复杂等 原因,有关水炭联合调控稻田氨挥发的试验研究开展 较少,稻田水炭调控模式的氨挥发减排效果及作用机 制尚不明确。近年来, DNDC 模型在稻田温室气体排 放、土壤有机碳量以及氮素淋失模拟等方面应用较多, 取得了较理想的模拟结果,成了研究稻田氮素迁移过 程及效应的重要工具^[16]。【切入点】目前,利用 DNDC 模型开展稻田氨挥发的模拟研究多聚焦于水氮调控 情景^[17-20],基于 DNDC 模型开展水炭调控稻田氨挥 发的研究还鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究 通过原位观测试验得到稻田氨挥发的实测数据,对 DNDC 模型进行参数的率定和验证,运用 DNDC 模 型模拟水炭联合调控对稻田氨挥发的影响及作用机 制,探寻减少氨挥发损失最优方案,以期为加强稻田 氮素的管控、减少稻田氨挥发损失提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

模拟试验依据的是 2018—2019 年在南京市高淳 区桠溪镇尚义村(东经 119 9'40",北纬 31 24'42") 开展的田间原位观测试验。研究区位于北亚热带和中 亚热带过渡地区,受季风环流影响,区域性气候明显,

收稿日期: 2022-10-27 修回日期: 2023-04-17 网络出版日期: 2023-05-12 基金项目: 国家自然科学基金项目(51609141);中央级公益性科研院所 基本科研业务费专项资金项目(Y920008, Y921013);江苏水利科学项 目(2021052)

作者简介: 毕文通(1998-),男。硕士研究生,主要从事农田高效灌排 理论研究。E-mail:wentongbi9867@163.com

通信作者:和玉璞(1987-),男。高级工程师,主要从事农田高效灌排 技术及环境效应研究。E-mail: heyupu28@163.com

常年四季分明,多年平均气温 16 ℃,多年平均降水 量 1 190.8 mm。当地习惯稻麦轮作,土壤为渗育水稻 土,耕层土壤为黏壤土,土壤有机质量为 34.2 g/kg, 全氮量为 2.01 g/kg,全磷量为 0.46 g/kg,全钾量为 12.87 g/kg,土壤 pH 值为 7.2。0~20、0~30、0~40 cm 土 层土壤饱和体积含水率分别为 52.0%、50.1%、47.9%。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

试验中稻田灌溉处理为控制灌溉^[21](简记为C), 小麦秸秆生物炭添加量设置4个水平:0 $t/hm^2(K)$ 、10 $t/hm^2(L)$ 、20 $t/hm^2(M)$ 和40 $t/hm^2(H)$,共4 个处理(CK、CL、CM、CH),每个处理3个重复。 试验采用南京勤丰秸秆科技有限公司生产的小 麦秸秆生物炭,生物炭平均孔径为15.745 nm,平均 孔容为0.049 cm³/g,平均比表面积40.483 m²/g。在组 成成分方面,C、H、N组成比例分别为38.523%、 2.370%、1.320%。水稻品种为南粳5505,各处理的 植保、耕作等措施保持一致。各处理稻田均参考农民 习惯施肥,氮素施肥过程如表1所示,2 a的水稻生 长情况有所差异,故施肥量略有不同。各处理稻田均 施加45.0 kg/hm²磷肥(P₂O₅)和63.5 kg/hm² 钾肥 (K₂O),磷肥、钾肥作基肥同时施入稻田。

表1 稻田施肥时间与施肥量

Table 1 Fertilizer application time and amount in paddy field

				-	-			
头目生来	化四五十十	2018 年			2019 年			
他肥仲尖	化肥柙尖	施肥日期	施肥量/(kg hm ⁻²)	施氮量/(kg hm ⁻²)	施肥日期	施肥量/(kg hm ⁻²)	施氮量/(kg hm ⁻²)	
基肥	碳酸氢铵, 含氮量≥17.1%	20180613	497	85	20190612	546	93.5	
分蘖肥	尿素, 含氮量≥46.2%	20180704	105	52.2	20190625	81	40.2	
	复合肥,含氮量≥17%	20100704	21	52.2		16		
穗肥	尿素,含氮量≥46.2%	20180730	132	65.5	20190724	152	75.5	
	复合肥,含氮量≥17%	20100750	26	05.5	20170724	30		
合计			781	202.7		825	209.2	

试验在配套有独立灌排设备的田间小区进行,每 个小区面积为 60 m²(12 m×5 m),每个小区灌溉系 统独立布设且安装有机械水表用于计量灌水量。每个 小区之间使用砖砌田埂进行分割,田埂高度为 100 cm, 田面以上 20 cm、田面以下 80 cm,沿田埂两侧布设 同样埋深的防水农膜,以减少小区之间的侧向渗漏。

本研究在 2018 年 6—10 月进行预试验, 6 月 16 日插秧, 10 月 20 日收割。2019 年 6—10 月进行田间 试验, 6 月 5 日插秧, 10 月 12 日收割。采用通气法 进行稻田氨挥发通量的原位观测^[20,22]。取样时间为: 每次施肥后,以第 1 天为起始点开始每天采样,取样 3 次,然后每 2 天采样 1 次,共计采样 2 次,然后每 隔 4 d 取样,取 2 次以后取样间隔延长到 7 d,随后 的间隔逐渐延长到 5~10 d 采样 1 次,直到下一次施 肥或挥发速率稳定为止。采样后,将通气法装置中下 层的海绵分别装入 500 mL 的玻璃瓶中,加 450 mL 的 1.0 mol/L 的 KCL 溶液,使海绵完全浸于其中,密 封后振荡 1 h,用纳氏试剂比色法^[23]测定浸取液中的 铵态氮。氨挥发通量计算式为:

$$V_{\rm NH_3-N} = \frac{M}{4 \times D} \times 10^{-2}, \qquad (1)$$

式中: *V*_{NH3-N}为单位时间内单位面积上的氨挥发量 (kg/(hm² d)); *M*为通气法单个装置平均每次测 得的铵态氮量(mg); *A*为捕获装置的横截面积(m²); *D*为单次连续捕获所用时间(d)。

1.2.2 DNDC 模型

DNDC 模型是农业生态系统中控制碳和氮迁移

转化的生物化学及地球化学反应机制的计算机模拟 表达^[24]。利用 2019 年各处理稻田田间实测数据和模 拟数据进行模型检验和验证。模型输入参数包括:实 测气象资料(逐日最高气温、最低气温、降水量)、 实测土壤参数(土壤质地、土壤体积质量、pH 值、 黏土量、土壤有机质量、初始硝态氮质量浓度、初始 铵态氮质量浓度等)和农田管理资料(播种和收获日 期、翻耕、施肥管理等)。模型所需数据在田间观测 试验中获取。根据本次试验的实测数据,将土壤有机 质量、初始硝态氮质量浓度、初始铵态氮质量浓度 与生物炭添加量进行拟合,拟合结果如图1所示。 由图 1 可知, 土壤有机质量与生物炭添加量成正比, 二者之间呈二次曲线关系且拟合精度为0.99;初始硝 态氮质量浓度、初始铵态氮质量浓度与生物炭添加量 成反比,二者与生物炭添加量之间皆呈二次曲线关系 且拟合精度为0.99。因此,本研究在模型中通过调整 土壤有机质量、初始硝态氮质量浓度和初始铵态氮质 量浓度间接实现生物炭添加影响的模拟。

1.2.3 稻田水炭调控情景设置

设计了 3 种灌水处理,以灌溉临界指标下限作为 控制指标,其中灌水处理 1 (I1)的灌溉临界指标下 限为 0 mm,灌水处理 2 (I2)的灌溉临界指标下限为 饱和含水率的 80%,灌水处理 3 (I3)的灌溉临界指 标下限为饱和含水率的 50%,各灌水处理的灌溉临界 指标上限均为 30 mm。针对设计的 I1、I2、I3 灌水处 理分别推求稻田灌溉过程,对应设置了 3 个气象资料 文本作为 DNDC 模型模拟输入参数。 灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com





Fig.1 Fitting of relationship between soil organic matter, initial nitrate nitrogen mass concentration,

initial ammonium nitrogen mass concentration and biochar addition amount

设计了 12 种生物炭添加水平,分别为 4 t/hm² (B1)、8 t/hm²(B2)、12 t/hm²(B3)、16 t/hm² (B4)、20 t/hm²(B5)、24 t/hm²(B6)、28 t/hm² (B7)、32 t/hm²(B8)、36 t/hm²(B9)、40 t/hm² (B10)、44 t/hm²(B11)、48 t/hm²(B12)。计算 不同生物炭添加量下土壤有机质量、初始硝态氮质量 浓度和初始铵态氮质量浓度,确定 DNDC 模型对应 输入参数,从而在 DNDC 模型中模拟不同生物炭添 加量处理稻田氨挥发损失过程。

将灌水处理、生物炭添加量处理进行组合,设置 了 36 组水炭调控情景,通过 DNDC 模型模拟得到不 同水炭调控稻田氨挥发损失量的变化过程,探求稻田 氨挥发损失的最优水炭调控模式。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016、Origin 8.5 处理数据,

采用 SPSS24.0 进行 F 检验(差异显著性水平为 p=0.05)。2018 年预试验观测数据不具备连续性,本 研究只对 2019 年试验观测数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 模型验证与评价

根据 2019 年的田间实测数据,校正 DNDC 模型 参数,对 CK、CL、CM、CH 处理稻田分蘖肥后 1 周氨挥发损失量进行模型适应性检验。分蘖肥后 1 周 稻田氨挥发损失量模拟值和实测值相对误差在 ±8% 以内(表 2),故应用 DNDC 模型模拟水炭调控稻田 氨挥发是可行的。稻田穗肥后 1 周和整个稻季氨挥发 损失量模拟值和实测值相对误差均在 ±6% 以内(表 2), 故 DNDC 模型模拟稻田氨挥发可行。

	表 2 不同水炭调控稻田氨挥发损失量模拟值与实测值
Table 2	Comparison of simulated and measured values of total ammonia volatilization in

		_	-									
也長	分蘖肥后1周			_	穂肥后1周			整个稻季				
1日7小	CK	CL 处理	CM 处理	CH 处理	CK	CL 处理	CM 处理	CH 处理	CK	CL 处理	CM 处理	CH 处理
实测值/(kg hm ⁻² d ⁻¹)	11.8	12.1	10.3	9.5	25.6	21.4	19.6	14.6	44.4	43.3	42.4	33.0
模拟值/(kg hm ⁻² d ⁻¹)	11.2	13.0	10.9	9.9	24.1	20.5	19.1	15.4	46.8	42.3	40.1	31.1
相对误差/%	-5.30	7.44	5.97	4.84	-5.84	-4.23	-2.52	5.41	5.47	-2.21	-5.41	-5.74

paddy field under different water and biochar treatments

模拟结果表明,稻田氨挥发主要发生在施肥后 1周之内,且氨挥发通量峰值在施肥后的5d内出现。 各处理稻田氨挥发通量模拟值的变化规律与实测值 基本一致,2次施肥后的模拟过程与实测过程较为契



合, 氨挥发通量模拟值的峰值出现时间与田间实测过 程较接近(图2)。总体来看, DNDC 模型能够较好 模拟稻田氨挥发损失动态过程。





Fig.2 Comparison of simulated and measured ammonia volatile flux in paddy field under different water and biochar treatment

2.2 不同生物炭添加量处理下氨挥发损失量变化规律

相同灌溉处理下,分蘖肥后1周内的稻田氨挥发 损失量呈随生物炭添加量增加而小幅递减的趋势;穗 肥后1周内,稻田氨挥发损失量随生物炭添加量的增 加持续走低,且趋势平缓,如图3所示。各处理稻田 穗肥后1周的氨挥发损失量均大于分蘖肥后1周,穗 肥后1周的氨挥发损失量均占整个稻季总量的1/2, 这是由于穗肥施肥量较大,增加了氨挥发的氮源,而 且穗肥后1周气温较分蘖肥后1周气温升高,土壤水 分蒸发速率加快,土壤水汽携带作用^[25]导致穗肥后氨 挥发速率高于分蘖肥后氨挥发速率。

纵观整个稻季,稻田氨挥发损失量随生物炭添加 量的增加持续降低,但不同生物炭添加量处理无显著 差异。I1 灌水处理下,B10 处理氨挥发损失量最低, 较 B1 处理降低了 1.84%;I2、I3 灌水处理下,B11 处 理的氨挥发损失量最低,分别较 B1 处理降低了 1.53% 和 1.61%。特别地,生物炭添加量达到 40 t/hm²以上后, 分蘖肥后 1 周、整个稻季的稻田氨挥发损失量随生物 炭添加量增加而略微增加,但整体呈随生物炭添加量 的增加而降低的趋势。





图 3 I1、I2、I3 处理下不同生物炭添加量下稻田氨挥发损失量 Fig.3 Ammonia volatilization loss in paddy fields with different

biochar application rates under I1, I2 and I3 treatment

2.3 不同灌水处理下氨挥发损失量变化规律

相同生物炭添加量下,不同灌溉处理稻田分蘖肥 后1周、穗肥后1周以及整个稻季的稻田氨挥发损失 量随灌水量的减少呈下降趋势,详见图4。生物炭添 加量相同时,I2处理分蘖肥后1周氨挥发损失量较I1 处理降低了1.58%~2.66%,穗肥后1周氨挥发损失量 降低了1.80%~2.31%,整个稻季氨挥发损失量降低了 2.12%~2.46%;I3处理分蘖肥后1周氨挥发损失量 [2处理降低了6.65%~7.12%,穗肥后1周氨挥发损失量 量升高了0.54%~1.06%,整个稻季氨挥发损失量降低 了0.24%~0.45%。稻田氨挥发损失量随着灌水下限的 降低小幅下降,减少灌水会在一定程度上减少稻田氨 挥发损失。

分蘖肥后 1 周, I1、I2 处理氨挥发损失量变化幅 度随生物炭添加量增加呈减小趋势,在生物炭添加量 达 20 t/hm²后变化幅度趋于稳定,保持在 1.5%左右。 I2、I3 处理的氨挥发损失量变化幅度随生物炭添加量 增加基本保持在 6.5%~7.5%之间。穗肥后 1 周,I1、 I2 处理氨挥发损失量变化幅度和 I2、I3 处理氨挥发 损失量变化幅度在 24 t/hm²的生物炭添加量下出现陡 升,在其余生物炭添加量时分别保持在 1.8%和 0.5% 左右。纵观整个稻季,I1、I2 处理的氨挥发损失量变 化幅度随生物炭添加量增加呈略轻微减小趋势,I2、





Fig.4 Ammonia volatilization loss in different irrigated paddy fields under B1-B12 biochar application rates

2.4 水炭调控对稻田氨挥发减排的影响分析

生物炭添加量和灌水处理均显著影响分蘖肥后1 周、穗肥后1周及整个稻季稻田氨挥发损失量 (p<0.05),其中灌水处理是主要影响因素,生物炭 添加量次之(表3)。当控制生物炭添加量不变时, I1、I2、I3 灌水处理下的稻田氨挥发损失量随灌水量 减少而减少;同一灌溉处理下,不同生物炭添加量下 的稻田氨挥发损失量随生物炭添加量增加而减少。应 在控制灌溉的条件下增加生物炭添加量来调控稻田 氨挥发。



图 5 不同灌水处理各阶段稻田氨挥发损失量变化幅度

Fig.5 Variation amplitude of ammonia volatilization loss in paddy fields under different irrigation treatments at different stages

表3 不同时期氨挥发影响因素 F 检验

volatilization in different periods							
时期	来源	F	显著性				
公薛即后1周	生物炭添加量	4.606	0.001				
刀柴加口工向	灌水	3 620.019	0.000				
辅 即戶1国	生物炭添加量	81.703	0.000				
118月11日 11月	灌水	1 721.234	0.000				
敕入挼禾	生物炭添加量	242.113	0.000				
金丁相子	灌水	6 174.601	0.000				

 Table 3
 F-test on influencing factors of ammonia

3讨论

本研究中相同灌水处理下稻田氨挥发损失量大 体上呈随生物炭添加量增加而小幅递减趋势。添加生 物炭可以减少土壤水分的散失,提高土壤含水率,增 强土壤溶液对氨的溶解能力,减少土壤氨挥发^[25]。另 外, 土壤氨挥发与土壤中的 NH4+-N 量极显著正相关 (p<0.01)^[26],武丽君^[27]研究表明,生物炭可以促进 碱性农田土壤的氨氧化作用,加速土壤 NO3-N 的生 成,降低 NH4⁺-N 的生物有效性,随着生物炭添加量 的增加,土壤中 NH₄+-N 质量浓度减小,从而减少稻 田氨挥发。而且生物炭表面附着大量的离子电荷,施 入土壤后生物炭表层的离子会与土壤中的离子发生 交换,从而吸附大量的 NH₄⁺-N,使得大部分尿素分 子和交换性 NH4+-N 得以保存在耕作层中,进一步减 少了稻田的氨挥发^[28]。许云翔等^[29]研究表明,生物炭 可以通过物理、化学作用吸附土壤中的 NH3 和 NH4+-N,并且可以加速土壤硝化过程提高土壤对铵态 氮的利用率,从而减少稻田氨挥发量。但不同生物炭 添加量对稻田氨挥发的影响并不一致,添加过高用量 的生物炭可能会促进土壤氨挥发,这可能是由于添加 生物炭增加了土壤呼吸,加速了气体交换^[30]。在同一 灌溉条件下,稻田氨挥发可能随生物炭添加量的增加 呈先降低后增加的趋势[15]。

本研究中灌水模式对稻田氨挥发影响显著,水分

条件是影响稻田氨挥发的主要的因素之一[31]。总体来 看, I1、I2、I3 灌水处理下稻田氨挥发损失量呈下降 趋势。当土壤含水率较大时,土壤水汽携带作用不仅 增强了氨挥发速率,也增大了氨挥发量^[25]。当土壤含 水率较小时,肥料的分解和氧化作用减弱,降低了土 壤氨挥发速率^[32]。而且灌溉临界指标下限较低时,稻 田在由施肥时建立的薄水层变为无水层的过程中,肥 料水解后产生大量的 NH4⁺随水分向土壤下层迁移, 减少了表层土壤溶液中的 NH4⁺,从而降低了稻田氨 挥发^[13]。杨士红等^[20]研究表明,控制灌溉既大幅度降 低稻田氨挥发速率,又降低了稻田大部分无施肥时段 的氨挥发损失,可以通过节水灌溉的方式减少稻田氨 挥发损失。邬刚等^[33]研究指出,水分管理措施影响稻 田的氨挥发强度,控制灌溉能显著降低分蘖肥和穗肥 氨挥发排放量,相同氮肥管理下控制灌溉稻田氨挥发 积累总量低于常规灌溉。

本研究以减少稻田氨挥发损失为目标,基于 DNDC 模型模拟了水炭调控对稻田氨挥发的影响过程, 获得了较为可靠的结果。I3B11 处理为稻田水炭调控 最优模式,稻田氨挥发损失量最小。灌水和生物炭添 加量均显著影响稻田氨挥发损失,灌水处理是主要影 响因素,在采用更为严格的节水灌溉技术下,适当增 加生物炭添加量,可以最大程度减少稻田氨挥发损失。

4 结 论

1) 基于 DNDC 模型构建的水炭调控稻田氨挥发 过程模拟模型,能够较好的模拟节水灌溉稻田添加生 物炭后的土壤氨挥发损失特征。

2)随着生物炭添加量的增加,相同灌溉处理稻
 田氨挥发损失量呈小幅降低趋势;相同生物炭添加水
 平下,稻田氨挥发损失量随灌水下限的降低小幅下降。

3)灌水处理和添加生物炭均显著影响稻田氨挥 发损失,灌水处理是主要影响因素,对稻田氨挥发的

作用明显强于生物炭添加量,在控制灌水下限的基础 上适当增施生物炭可以有效降低稻田氨挥发量。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- 徐嘉翼,牛世伟,隋世江,等.聚天门冬氨酸/盐对水稻田面水氮素变 化及养分利用的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1696-1703.
 XU Jiayi, NIU Shiwei, SUI Shijiang, et al. Effects of polyaspartic-acid/salt on nitrogen loss from paddy surface water and nutrients utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 1696-1703.
- [2] JIN J Y. Changes in the efficiency of fertiliser use in China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(5): 1 006-1 009.
- [3] 王梦凡, 俞映倞, 杨梖, 等. 界面阻隔材料对稻田产量、氮肥利用率 和氨挥发排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 803-812.
 WANG Mengfan, YU Yingliang, YANG Bei, et al. Effects of interface barrier materials on rice yield, nitrogen use efficiency, and NH3

volatilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 803-812. [4] 张海鹏,陈志青,王锐,等. 氮肥配施纳米镁对水稻产量、品质和氮

肥利用率的影响[J]. 作物杂志, 2022(4): 255-261. ZHANG Haipeng, CHEN Zhiqing, WANG Rui, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with nano-magnesium on rice yield, grain quality and nitrogen use efficiency[J]. Crops, 2022(4): 255-261.

- [5] ZHAO X, XIE Y X, XIONG Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu Lake region, China[J]. Plant and Soil, 2009, 319(1): 225-234.
- [6] 王红,张瑞芳,周大迈. 氮肥引起的面源污染问题研究进展[J]. 北方 园艺, 2011(5): 201-203.
 WANG Hong, ZHANG Ruifang, ZHOU Damai. Current situations and research progress of non-point pollution problems caused by nitrogen[J]. Northern Horticulture, 2011(5): 201-203.
- [7] PAN B B, LAM S K, MOSIER A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 232: 283-289.
- [8] 王艳阳,魏永霞,孙维鹏,等.不同生物炭施加量的土壤水分入渗及 其分布特性[J].农业工程学报,2016,32(8):113-119.
 WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 113-119.
- [9] 李松,李海丽,方晓波,等. 生物质炭输入减少稻田痕量温室气体 排放[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 234-240.
 LI Song, LI Haili, FANG Xiaobo, et al. Biochar input to reduce trace greenhouse gas emission in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 234-240.
- [10] 秦晓波,李玉娥, WANG Hong,等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳 排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 226-234. QIN Xiaobo, LI Yu'e, WANG Hong, et al. Impact of biochar amendment on carbon emissions intensity in double rice field in South China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 226-234.
- [11] 马珍,黄凯文,张珍明,等.添加生物炭对土壤磷素有效性影响研究 进展[J]. 东北农业大学学报,2021,52(8):89-96.
 MA Zhen, HUANG Kaiwen, ZHANG Zhenming, et al. Effects of adding biochar on availability of soil phosphorus: A review[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(8): 89-96.
- [12] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业 科学,2013,46(16):3 324-3 333.

CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(16): 3 324-3 333.

- [13] 彭世彰,杨士红,徐俊增.节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 35-39.
 PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(8): 35-39.
- [14] 肖新,杨露露,邓艳萍,等.水氮耦合对水稻田间氨挥发规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 2 066-2 071.
 XIAO Xin, YANG Lulu, DENG Yanping, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on ammonia volatilization in paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 2 066-2 071.
- [15] 薛建文,庞桂斌,丛鑫,等.不同灌水和生物炭量对夏玉米农田氨挥发的影响[J].节水灌溉,2022(7):29-35.
 XUE Jianwen, PANG Guibin, CONG Xin, et al. Effects of different irrigation and biochar amounts on NH₃ volatilization in summer maize fields[J]. Water Saving Irrigation, 2022(7):29-35.
- [16] 周王子,洪军,刘原草,等. 基于 DNDC 模型的南方典型稻田氮素 去向及其优化管理[J]. 节水灌溉, 2022(4): 1-7. ZHOU Wangzi, HONG Jun, LIU Yuancao, et al. A study on nitrogen fate and optimal management for paddy fields in Southern China by using DNDC model[J]. Water Saving Irrigation, 2022(4): 1-7.
- [17] 李东丽. 基于 DNDC 模型的干旱区水稻田温室气体排放实验研究: 以乌鲁木齐市米东区为例[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2021.
 LI Dongli. Experimental study on greenhouse gas emissions from paddy fields in arid areas based on DNDC model: Taking Midong district of Urumqi as an example[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.
- [18] 颜学斌, 王俊, 王科锋, 等. 基于 DNDC 模型模拟的冬小麦田土壤 有机碳和作物产量对地表覆盖的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 42-49.
 YAN Xuebin, WANG Jun, WANG Kefeng, et al. Responses of soil

organic carbon and crop yield to surface mulching with straw and plastic film in winter wheat field using DNDC model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 42-49.

[19] 赵峥, 吴淑杭, 周德平, 等. 基于 DNDC 模型的稻田氨素流失及其 影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2 405-2 412. ZHAO Zheng, WU Shuhang, ZHOU Deping, et al. Modeling N loss from paddy fields and sensitivity analysis with DNDC model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(12): 2 405-2 412.

- [20] 杨士红,彭世彰,徐俊增,等.不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征 及模拟[J].农业工程学报,2012,28(11):99-104. YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11): 99-104.
- [21] 张忠学,宋健,齐智娟,等. 控制灌溉氮肥减施对土壤氮素分布及氮 素利用率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(3): 42-49, 60. ZHANG Zhongxue, SONG Jian, QI Zhijuan, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer application on soil nitrogen distribution and nitrogen use efficiency under water-saving irrigation[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(3): 42-49, 60.
- [22] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定一通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209.
 WANG Zhaohui, LIU Xuejun, JU Xiaotang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Natrition and Fertilizen Science, 2002, 8(2): 205-209.
- [23] 施晓梅. 纳氏试剂比色法测定水中的氨氮[J]. 科技创新与应用, 2017(26): 81-82.

SHI Xiaomei. Determination of ammonia nitrogen in water by Nessler's

reagent colorimetry[J]. Technology Innovation and Application, 2017(26): 81-82.

[24] 李长生. 生物地球化学的概念与方法: DNDC 模型的发展[J]. 第四 纪研究, 2001, 21(2): 89-99.

LI Changsheng. Biogeochemical concepts and methodologies: Development of the DNDC model[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(2): 89-99.

- [25] 高鹏程,张一平. 氨挥发与土壤水分散失关系的研究[J]. 西北农林 科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 22-26. GAO Pengcheng, ZHANG Yiping. Research on relationship between volatilization of ammonia and evaporation of soil water[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2001, 29(6): 22-26.
- [26] 王峰,陈玉真,吴志丹,等. 酸性茶园土壤氨挥发及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 808-816.
 WANG Feng, CHEN Yuzhen, WU Zhidan, et al. Ammonia volatilization and its influencing factors in tea garden soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(4): 808-816.
 [27] 武丽君. 生物炭对农田土壤氮素迁移及氨氧化作用的影响[D]. 太原:
- 太原理工大学, 2016. WU Lijun. Effects of biochar on nitrogen migration and ammonia oxidation in farmland soil[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [28] 刘春晓,曹杨,王晓杰,等.小麦秸秆对尿素中养分的吸附研究[J]. 江西农业学报,2010,22(7):125-127.
 LIU Chunxiao, CAO Yang, WANG Xiaojie, et al. Research on absorption of wheat straw to nutrient in urea solution[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(7): 125-127.
- [29] 许云翔, 何莉莉, 陈金媛, 等. 生物炭对农田土壤氨挥发的影响机制

研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4 312-4 320.

XU Yunxiang, HE Lili, CHEN Jinyuan, et al. Effects of biochar on ammonia volatilization from farmland soil: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4 312-4 320.

- [30] 董玉兵, 吴震, 李博, 等. 追施生物炭对稻麦轮作中麦季氨挥发和氮 肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1 258-1 267. DONG Yubing, WU Zhen, LI Bo, et al. Effects of biochar reapplication on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency during wheat season in a rice-wheat annual rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(5): 1 258-1 267.
- [31] 吴萍萍,刘金剑,杨秀霞,等.不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨 挥发的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 85-93.
 WU Pingping, LIU Jinjian, YANG Xiuxia, et al. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-rice cropping field in red soil region[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(1): 85-93.
- [32] 卢丽兰,甘炳春,许明会,等.不同施肥与灌水量对槟榔土壤氨挥发的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4 477-4 484.
 LU Lilan, GAN Bingchun, XU Minghui, et al. Effect of different fertilization and irrigation practices on soil ammonia volatilization of Arecanut (*Areca catechu* L.)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4 477-4 484.
- [33] 邬刚,袁嫚嫚,曹哲伟,等.不同水氮管理条件下稻田氨挥发损失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 651-658.
 WU Gang, YUAN Manman, CAO Zhewei, et al. Ammonia volatilization under different water management and nitrogen schemes in a paddy field[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 651-658.

Using DNDC Model to Help Mitigate Ammonia Volatilization from Paddy Fields

BI Wentong¹, JI Renjing¹, HE Yupu^{1*}, FU Jing¹, SHANG Ming²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Jiangsu Jiangdu Water Conservancy Project Management Office, Yangzhou 225200, China)

Abstract: [Objective] Reducing nitrogen loss from leaching and emissions is essential to increasing nitrogen fertilizer use efficiency in developing sustainable agriculture. This paper is to propose an optimization of water and carbon to reduce ammonia volatilization from paddy fields. [Method] The DNDC model was used to simulate the processes involved in ammonia volatilization; it considered the effects of both water and biochar application. The model was validated against field measurements, and it was then used to investigate the changes in ammonia volatilization from paddy fields under different combinations of irrigation and biochar addition, from which the optimal irrigation and biochar application that gave the least ammonia volatilization and gas emissions was determined. [Result] The relative errors between the simulated and measured ammonia volatilization were less than 8%. The model hence accurately captured the fundamental processes underlying ammonia volatilization from paddy fields. When irrigation was the same, increasing biochar addition reduced ammonia volatilization. When biochar addition was the same, reducing irrigation amount reduced the ammonia volatilization. Irrigation and biochar application significantly influenced ammonia volatilization, but ammonia volatilization was more sensitive to irrigation than to biochar addition. [Conclusion] Among all treatments we compared, the combination I3+B11 was the optimal irrigation and biochar application for reducing ammonia volatilization from paddy fields. Rationally increasing biochar application combined with a decrease in irrigation amount can effectively reduce ammonia volatilization and gas emissions from paddy fields.

Key words: DNDC; ammonia volatilization; biochar; controlled irrigation; paddy fields

责任编辑: 白芳芳