吴　凡, 张克强, 谢　坤, 等. 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1735-1742.
WU Fan, ZHANG Ke-qiang, XIE Kun, et al. Characteristics of ammonia volatilization from rice paddy fields under different fertilization treatments in typical agricultural areas of Erhai basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1735-1742.

洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征

吴　凡[1,2,3], 张克强[1,3], 谢　坤[1,2,3], 王　风[1,3], 王瑞琦[1,2,3], 尹高飞[1,3], 沈仕洲[1,3*]

(1.农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 3.农业农村部大理农业环境科学观测实验站, 大理 671004)

摘　要: 为探寻洱海流域合理的施肥方式,减少氮肥的氨挥发损失,采用"密闭室间歇通气法",研究了不同氮肥类型及施氮量对稻田氨挥发规律、氨挥发累积量及水稻产量的影响,并探究了影响氨挥发排放的因素。研究结果表明:稻田氨挥发主要发生在施肥后2~5 d内,穗肥期氨挥发损失占比最大为19.04%~33.00%,其次分蘖肥期损失为7.18%~15.72%,基肥期损失最少为4.89%~7.76%。不同施肥处理中常规施肥(CF)、化肥减量20%(T1)、单施有机肥(T2)、有机肥与化肥配施(T3)、考虑当季25%矿化率单施有机肥(T4)、考虑当季25%矿化率有机肥与化肥配施(T5)和单施控释肥(T6)的氨挥发累积量分别为42.52、22.73、11.71、15.12、38.24、25.95 kg·hm^{-2}和18.44 kg·hm^{-2}。等量施氮条件下不同肥料类型氨挥发损失占比大小为尿素>控释肥>有机肥+化肥>有机肥。不同施氮量条件下,施氮量越大氨挥发累积量越大,且氨挥发速率与田面水NH_4^+-N浓度呈正相关性。综合稻田氨挥发累积量及水稻产量,在洱海流域典型农区水稻种植中,有机肥与化肥配施(25%当季矿化率)、化肥减量施用(20%)以及控释肥施用是3种较优的环境友好型施肥方式。

关键词: 洱海流域;稻田;氮肥类型;氨挥发速率;氨挥发累积量
中图分类号: X592　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2019)08-1735-08　　doi:10.11654/jaes.2018-1621

Characteristics of ammonia volatilization from rice paddy fields under different fertilization treatments in typical agricultural areas of Erhai basin

WU Fan[1,2,3], ZHANG Ke-qiang[1,3], XIE Kun[1,2,3], WANG Feng[1,3], WANG Rui-qi[1,2,3], YIN Gao-fei[1,3], SHEN Shi-zhou[1,3*]

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2.College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201,China; 3.Dali Agro-Environmental Science Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China)

Abstract: Ammonia(NH_3) volatilization is one of the major ways of nitrogen loss in paddy field. To reduce NH_3 volatilization and optimize fertilization scheme for paddy fields in the Erhai basin, effects of fertilizer types, nitrogen application rate and management strategies on NH_3 volatilization and rice grain yield were investigated using closed-chamber intermittent ventilation method. Correlation between NH_3 volatilization and soil characteristics were also evaluated. Results showed that, maximum NH_3 volatilization occurred within 2~5 days after fertilization. Moreover, the NH_3 volatilization loss accounted for 19.04%~33.00% at panicle growth stage, about 7.18%~15.72% at tillering stage, and about 4.89%~7.76% at basal stage. The NH_3 volatilization accumulations of conventional fertilization(CF), 20% nitrogen reduction(T1), refined organic fertilizers(T2), organic fertilizer and chemical fertilizer(T3), considering 25% mineralization rate of refined organic fertilizers(T4), considering 25% mineralization rate of refined organic fertilizers along with conventional fertilization, refined organic

收稿日期: 2018-12-24　　**录用日期:** 2019-05-28
作者简介: 吴　凡(1993—),男,江苏淮安人,硕士研究生,从事农业面源污染防治研究。E-mail:547569504@qq.com
***通信作者:** 沈仕洲　E-mail:shenshizhou@126.com
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800103);云南省教育厅科研基金产业化项目(2016CYH11);云南省科技创新开放基金(2017HC015)
Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0800103); The Research Foundation of Yunnan Province, China(2016CYH11); The Technology Innovation Open Foundation of Yunnan Province, China(2017HC015)

fertilizers + conventional fertilization (T5), and controlled release fertilizer (T6) were 42.52, 22.73, 11.71, 15.12, 38.24, 25.95 kg·hm^{-2}, and 18.44 kg·hm^{-2}, respectively. Under the same amount of nitrogen application, the proportion of NH_3 volatilization loss of different fertilizer types was: conventional fertilization > controlled release fertilizer > refined organic fertilizers + conventional fertilization > refined organic fertilizers. Nitrogen application rate in different treatments were directly proportional to the accumulated amount of NH_3. In addition, NH_3 volatilization rate was positively related to NH_4^+-N concentration in the surface water. Considering the NH_3 volatilization accumulation and rice yield, compared with conventional fertilization, the treatments T1, T5 and T6 are environmentally friendly fertilization methods.

Keywords: Erhai basin; paddy fields; type of nitrogen fertilizer; ammonia volatilization rate; ammonia volatilization accumulation

我国作为世界第一大化肥消费国，氮肥用量占全球用量的35%左右，其中稻田氮肥占世界稻田氮肥用量的36.1%[1-2]，而平均氮肥利用率仅为30%~35%[3]。施入土壤中的氮肥可通过多种途径发生氮素损失：部分通过地表径流、淋溶等方式进入地表水、地下水中；其他则通过硝化-反硝化及氨挥发作用等释放到大气中[4]，其中以氨挥发形式损失的占5%~47%[5]。通过氨挥发产生的损失，不仅会导致农业面源污染，而且会影响大气透明度和空气质量。过量农田氮肥施用已成为我国水环境和大气环境污染的重要原因之一。由于水田氮肥多施用于表层，氨挥发损失较大[6]，并且受多种因素如气候条件、土壤性质以及农业措施的影响[7]，不同地区稻田氨挥发的情况存在较大差异。有研究表明，在中南丘陵酸性土双季稻区，土壤氨挥发损失范围为18.44%~32.20%[8]；在太湖流域低洼湖荡平原，稻田田面水pH为7.0~8.5时，氨挥发损失率为3%~14.6%[9]；在南方红壤地区双季稻田早、晚季氨挥发累积量分别占其施氮量的4.5%~15.3%和16.9%~32.8%[10]。洱海流域是典型的高原湖滨农业区，也是我国重点农业面源污染治理区。由于该地区海拔高、降雨集中等特殊性，而与其他地区存在较大差异，关于该地区稻田氨挥发损失情况的相关研究较为欠缺。

近年的研究表明，施氮量是影响稻田氨挥发最主要的因素，通常氨挥发损失量随施氮量增加而增加[11-12]，且不同类型氮肥表现出不同的氨挥发规律[13]。本试验主要考虑了不同氮肥类型及不同施氮量对氨挥发的影响，试验采用密闭室间歇通气法，旨在研究不同氮肥类型及不同施氮量的氨挥发损失情况，为有效减少肥料氮素损失、减少农业面源污染、提高洱海水质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省大理市喜洲镇，农业农村部大理农业环境科学观测实验站内（25°53′34″N，100°10′27″E）。该地区属典型的低纬高原中亚热带西南季风气候类型，海拔1980 m，年均气温14.6 ℃，常年主导风向为西南风；雨量充沛，年平均降雨量为908.8 mm，但85%~96%的降雨集中在5—10月份[14]，试验期间降雨量及气温情况见图1。供试水稻品种为云粳26号。供试土壤为暗棕壤，0~20 cm土壤基本理化性质为：全氮、全磷、全钾、水解性氮、有效磷、速效钾含量分别为3307、971、19 300.0、233、35.3、72.7 mg·

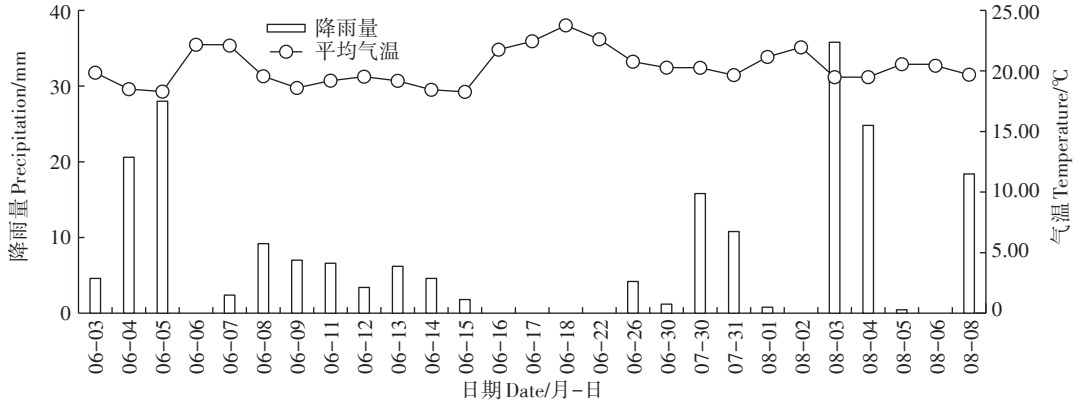


图1 2018年试验期间降雨量和气温情况

Figure 1 Rain fall and temperature during experimental period in 2018

kg^{-1},阳离子交换量为21.1 $cmol \cdot kg^{-1}$,有机质含量为57.3 $g \cdot kg^{-1}$,土壤pH值为7.1。

1.2 试验设计

试验共设8个处理:不施肥(CK);习惯施肥(CF),20%化肥减量施肥(T1);以N计,有机肥替代化肥(20%减量,下同)(T2);以P计,有机肥替代化肥,化学肥料补齐氮肥(T3);考虑有机肥当季矿化率(25%),以N计,有机肥替代化肥(T4);考虑有机肥当季矿化率(25%),以P计,有机肥替代化肥(T5);以N计,控释肥替代化肥(T6)。其中常规施肥氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾;控释施肥氮磷钾比例为23∶10∶12;有机肥为牛粪有机肥,含有机质14.5%,氮(N)2.3%,磷(P_2O_5)2.4%,钾(K_2O)5.7%。有机肥用作基肥,在翻耕前一次性施入,翻耕深度约20 cm,控释肥在分蘖期一次性施入,化肥分两次施入,在分蘖期施入总量的70%,在穗肥期施入总量的30%。每个施氮处理设3次重复,随机区组设计,具体施肥情况见表1。本试验田面管理均采用当地典型管理模式。

1.3 测定项目及方法

本试验采用密闭室间歇通气法测定稻田氨挥发量[15],利用抽气减压将田间挥发到空气中的氨吸入装有50 mL硼酸吸收液(20 $g \cdot L^{-1}$)的洗气瓶,田间挥发氨被硼酸溶液吸收后,利用标准稀硫酸溶液(0.01 $mol \cdot L^{-1}$)滴定,计算土壤氨挥发速率及氨挥发累积量。本试验将两个洗气瓶串联,以保证气体氨的充分吸收,密闭室采用透明有机玻璃材料制成,底部直径20 cm,上端露出水面5~8 cm,使水面与室顶之间形成一个有限的密闭空间,通过调节阀调节抽气量,使密闭空间的换气速率在15~20次$\cdot min^{-1}$。

试验开展时间为2018年6月2日—10月9日,6月2日施入基肥,6月12日施入分蘖肥,7月30日施入穗肥。在每日的9:00—11:00、15:00—17:00两个时间段采集挥发氨,并以这两个时间段的测定值估算当日氨挥发速率的平均值。本试验在施肥后7 d内连续测定田面水产生的挥发氨,之后根据氨挥发量间隔2~3 d采样,直至氨挥发量与CK处理无明显差异为止。在测定稻田氨挥发的同时采集田面水水样,用于测定NH_4^+-N浓度、NO_3^--N浓度和pH值。水样NH_4^+-N采用靛酚蓝比色法测定,NO_3^--N采用紫外分光光度法测定,pH值采用pH计测定。

1.4 计算方法与数据处理

根据如下公式计算氨挥发速率、氨挥发累积量及氨挥发损失率:

$$F=C_S\times(V_S-V_0)\times14\times10^{-2}\times24/(3.14\times r^2\times t)$$

$$R=\sum F\times100/N_F$$

式中:F为氨挥发速率,$kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$;$C_S$为1/2 H_2SO_4标准液的浓度,$mol \cdot L^{-1}$;V_S为样品吸收液消耗的稀硫酸溶液体积,mL;V_0为H_3BO_3指示剂溶液消耗的稀硫酸体积,mL;r为气室半径,0.1 m;t为氨挥发收集时间,h;R为氨挥发累计损失率,%;$\sum F$为氨挥发累积量,$kg \cdot hm^{-2}$;N_F为肥料氮施用量,$kg \cdot hm^{-2}$。

利用Microsoft Excel进行图表绘制,并利用SPSS Statistics统计软件对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理的氨挥发速率动态变化

整个水稻季,不同施肥处理在各时期的稻田氨挥发速率均呈现先上升后下降的规律。从图2可以看出,各处理的氨挥发高峰期都集中在施肥后的2~5 d

表1 不同施肥处理各施肥期施肥量($kg \cdot hm^{-2}$)

Table 1 The amount of fertilization in different fertilization treatments under different treatments($kg \cdot hm^{-2}$)

处理 Treatments	基肥 Base fertilizer	分蘖肥 Split fertilizer				穗肥 Spike fertilizer	合计折纯 Fold pure total		
	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 SSP	硫酸钾 SOP	控释肥 Control released fertilizer	尿素 Urea	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CF	0	296.8	450	180	0	127.2	195	72	90
T1	0	237.3	375	144	0	101.7	156	60	72
T2	6500	0	0	0	0	0	156	160	371
T3	2609	142.1	0	0	0	60.9	156	60	149
T4	26 000	0	0	0	0	0	624	598	1428
T5	10 435	142.1	0	0	0	60.9	345	240	595
T6	0	0	0	0	678	0	156	67.8	81

内。从各处理氨挥发速率峰值出现的时间可以看出，施入有机肥的氨挥发出现较迟，而施入尿素和控释肥之后很快便出现挥发氨，并且氨挥发速率迅速达到峰值。

比较各施肥期不同施氮处理的氨挥发速率，在基肥期只有T2、T3、T4、T5处理施入有机肥，这4个处理在施肥后的4~5 d内都达到了氨挥发速率的峰值，之后开始逐渐降低直至与CK处理氨挥发速率无明显差别，其他处理在基肥期没有施肥，产生的氨挥发量很小。CF、T1、T3、T5处理分蘖肥期施入尿素，T6处理施入控释肥。从追肥后第2 d开始，施入尿素处理的田面氨挥发速率迅速升高，并在第3 d达到峰值，CF、T1、T3、T5处理的峰值分别为7.84、5.47、2.73、4.53 kg·hm^{-2}·d^{-1}。在第4 d氨挥发速率发生了一定的下降，但在第5 d再次出现了氨挥发速率的上升。CF、T1、T3、T5处理施入穗肥的当日下午即出现了氨挥发，CF、T1、T3处理在第3 d氨挥发速率达到峰值7.95、4.85、2.61 kg·hm^{-2}·d^{-1}，T5处理则在施肥后第1 d便达到峰值4.03 kg·hm^{-2}·d^{-1}，之后开始逐渐降低直至与CK处理无明显差异。

2.2 不同施氮处理的氨挥发累积量

如图3所示，不同类型氮肥的氨挥发积累量差异较大。施入氮肥的稻田中挥发氨的来源包括土壤原本残留的氮素以及新施入的氮素。施肥稻田来自土壤残留氮素的氨挥发等于不施氮小区的挥发量，因此施肥小区来自氮肥的挥发氨可由其与不施肥小区的差值来估算[16]。各施肥处理氨挥发累积量依次为42.52、22.73、11.71、15.12、38.24、25.95、18.44 kg·hm^{-2}。其中常规处理CF的氨挥发累积量最大，其次为T4处理，氨挥发累积量最小的为T2处理。减量施肥的T1、T2和T3处理分别小于CF、T4及T5处理。将相同施氮量处理进行比较发现，施入化肥的T1处理氨挥发累积量最大，其次为施入控释肥的T6处理，最小的是施入有机肥的T2处理，有机肥部分替代化肥的T3处理其氨挥发累积量又小于T6处理。

从表2可以看出，只施入尿素的CF和T1处理氨

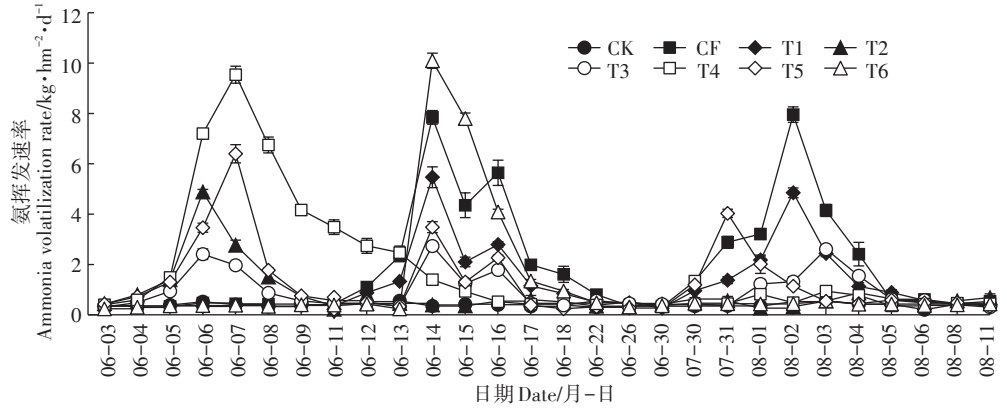


图2 不同施肥处理下稻田氨挥发动态变化

Figure 2 Changes of ammonia volatilization in rice field under different fertilization treatments

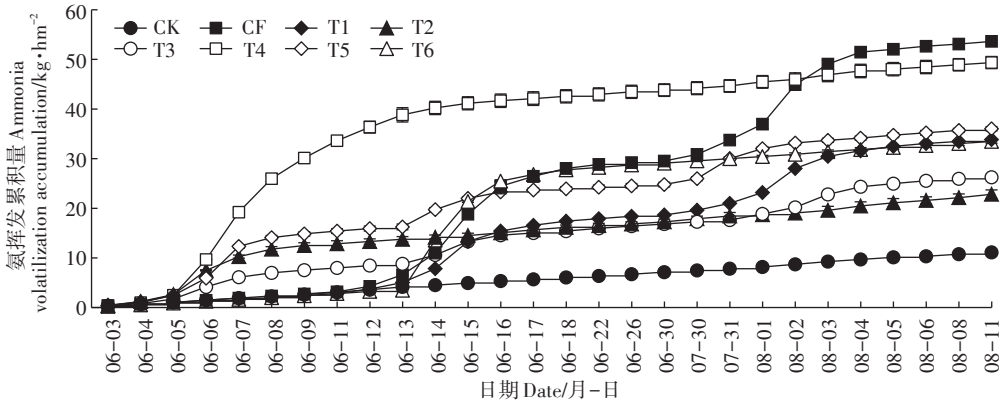


图3 不同施肥处理下的氨挥发累积量

Figure 3 Ammonia volatilization accumulation under different fertilization treatments

表2 不同处理各施肥期氨挥发损失占施氮量比(%)

Table 2 Ratio of ammonia volatilization loss to nitrogen application rate in different treatment periods(%)

处理 Treatments	施肥期 Periods			总氨挥发损失比 Ammonia volatilization loss
	基肥期 Basal stage	分蘖肥期 Tillering stage	穗肥期 Panicle stage	
CF	—	15.72	33.00	21.81
T1	—	10.21	23.04	14.57
T2	6.26	—	—	7.51
T3	7.76	7.18	19.04	9.69
T4	4.89	—	—	6.13
T5	4.93	9.55	22.86	7.57
T6	—	14.19	—	11.82

挥发损失占比最大,且T1处理损失占比为14.57%,小于CF处理的21.81%。其次为施入控释肥的T6处理,氨挥发损失占比最小的是施入有机肥的T4处理。T1、T2、T3和T6处理的总施氮量相同,但各处理间的氨挥发损失占比相差较大,大小依次为T1>T6>T3>T2。

比较各施肥阶段,CF、T1、T3和T5处理在分蘖肥期和穗肥期只施用尿素,从表中可以看出,分蘖肥期各处理氨挥发损失占施氮量比分别为15.72%、10.21%、7.18%和9.55%;穗肥期分别为33.00%、23.04%、19.04%和22.86%。穗肥期的氨挥发损失比明显高于分蘖期。

2.3 田面水不同形态氮素及pH相关性分析

如图4所示,各时期的田面水NH_4^+-N及NO_3^--N浓度在施入肥料的7~15 d内变化趋同,都呈现出先上升后下降的变化规律。但是不同处理之间也存在较大差异,总体看施氮量越大,田面水NH_4^+-N浓度的峰值越高,并且化肥处理峰值最大,有机肥处理峰值最小。在氨挥发测定期间,不同施肥方式的田面水pH在施肥后的2~5 d内逐渐升高,之后逐渐降低并趋于中性。

为进一步说明不同施肥类型及不同施肥量对稻田土壤氨挥发的影响,将8个处理运用相同分析方法进行田面水NH_4^+-N、NO_3^--N、pH和氨挥发速率之间的相关性分析,结果见表3。从表中可以看出,影响稻田氨挥发速率的主要因素为田面水NH_4^+-N浓度,且两者呈显著正相关,即田面水NH_4^+-N浓度越高,氨挥发速率越大。田面水NH_4^+-N浓度峰值出现时间比氨挥发速率峰值出现早,说明田面水NH_4^+-N由液相NH_3转化为气相NH_3的过程需要一定时间及条件。田面水NH_4^+-N与NO_3^--N浓度变化之间也存在

表3 田面水pH、NH_4^+-N、NO_3^--N和氨挥发速率相关性分析

Table 3 Correlation analysis of pH, NH_4^+-N, NO_3^--N and ammonia volatilization rate

指标 Index	pH	NH_4^+-N	NO_3^--N	氨挥发速率 Ammonia volatilization rate
pH	1			
NH_4^+-N	0.096	1		
NO_3^--N	0.062	0.341**	1	
氨挥发速率 Ammonia volatilization rate	0.083	0.546**	0.113	1

注:**表示在$P<0.01$水平极显著相关。

Note: ** indicates significantly correlated at $P<0.01$.

极显著相关,可以总结为NH_4^+-N浓度越高,转化为NO_3^--N的效率越高,因此相应的浓度也越高。结合图4和表3可以看出,田面水pH的变化对稻田氨挥发存在一定影响,但并不具有显著相关性,这是由于田面水pH值变化范围较小,在7.5~8.5之间,因此对氨挥发影响不显著。

3 讨论

各处理的氨挥发速率范围为2.41~10.09 kg·hm^{-2}·d^{-1},不同处理的氨挥发速率差异较大,这主要是由施用氮肥类型及施氮量不同造成的。从图1可以看出,在施入分蘖肥后第4 d发生了强降雨,造成田面气温降低,因此抑制了稻田土壤氨挥发速率,但随着气温回升氨挥发速率出现了再次上升。相关研究表明,降雨对氨挥发的抑制,主要是通过下渗作用将氮素带入土壤,增加NH_4^+被土壤吸附或被植株吸收的机会,并且增加上升到土壤表层的阻力,从而间接减少氨挥发损失[17]。在分蘖肥阶段存在强降雨现象,期间田面温度也随之降低,相应的CF、T1、T3、T5处理氨挥发速率从7.84、5.47、2.73、3.48 kg·hm^{-2}·d^{-1}下降至4.35、2.10、1.24、1.30 kg·hm^{-2}·d^{-1},这可能是由于温度降低造成尿素分解速率降低,因此导致氨挥发速率降低,在降雨停止、气温回升之后,氨挥发速率又上升至5.64、2.79、1.78、2.27 kg·hm^{-2}·d^{-1}。

通过图3比较CF、T1及基肥阶段T2~T5处理的氨挥发累积量可以发现,在一定范围内降低施氮量可以有效减少稻田氨挥发损失。比较相同施氮量的T1、T2、T3及T6处理可以发现,单纯施入化肥会造成更多的氨挥发损失,而有机肥及控释肥的使用能有效减少氮素通过氨挥发途径的损失,并且有机肥减少损失的效果更加明显,这与前人的研究结果基本一致[18-19]。

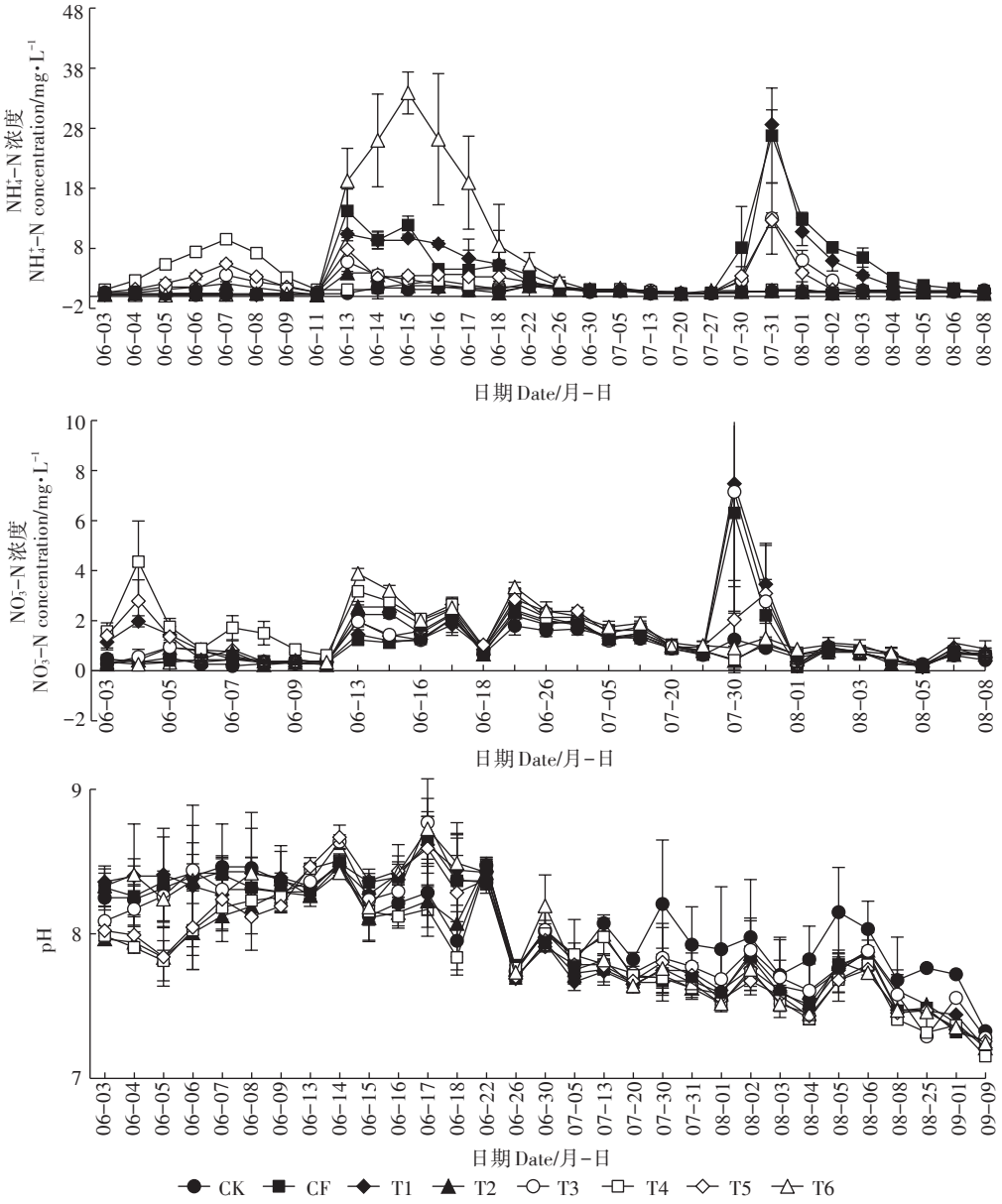


图4 不同施氮处理 NH_4^+-N、NO_3^--N 及 pH 的动态变化

Figure 4 Dynamic changes of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and pH in different nitrogen treatments

比较不同时期各处理的氨挥发损失占比可以发现，分蘖期的氨挥发损失占比要小于穗肥期，而基肥期的氨挥发损失占比最小。这可能是由于基肥期施用的只有有机肥，并且进行了农田翻耕，明显减少了氨挥发的损失。在分蘖肥阶段藻类植物和水稻生长需要的氮素迅速增加，相应的 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 的速率升高，导致稻田氨挥发量减少，同时在追施分蘖肥阶段发生了几次降雨，导致气温降低，也在一定程度上抑制了稻田氨挥发。而在穗肥期水稻生长速度开始减缓，并且田面水面的藻类生长也达到饱和，对氮素的需求量大幅降低，因此氮素转化速度降低，从而导致氨挥发量增加。

施肥量的减少造成了对应处理田面 NH_4^+-N 浓度的减少，使得稻田氨挥发损失也随之减少。由图4可以发现，不施肥处理CK与其他施肥处理比较，施肥后田面水pH随着时间推移在不断降低。有研究结果表明，氨挥发随着土壤pH值的升高而增大[20]，氨挥发本身是一个酸化过程，但是结合灌溉水的理化性质，在刚施肥时田面水pH为弱碱性，之后开始逐渐降低。另外，硝化作用也是酸化过程，在分蘖肥和穗肥阶段都只施加了尿素，尿素水解成 NH_4^+-N 后随着硝化作用的进行，也可能使田面水pH降低，这与贺发云等[21]

的发现相似。

从表4中可以看出,各施肥处理的水稻产量、氨挥发累积量差异显著,T6处理水稻产量最高为10 527 kg·hm^{-2},不施肥处理CK的水稻产量最低为4045 kg·hm^{-2}。与常规施肥CF相比,T1至T5处理水稻产量分别减少了1.6%、36.3%、15.2%、31.1%、1.7%,T6处理产量增加了5.5%。计算各处理单位产量产生的氨挥发累积量可综合评价作物产量与挥发氨排放代价,氨挥发累积量与水稻产量的比值可称为氨挥发产量标尺,大小依次为T6<T3<T2<T1<T5<CK<CF<T4。只施用控释肥的T6处理产量标尺最小为1.75 kg·t^{-1},这说明施用控释肥在保证水稻产量的同时,还可以减少氨挥发的排放。比较不同施氮水平下各处理产量标尺大小,T1<CF、T2<T4、T3<T5,CF与T1处理之间水稻产量差异不显著,但氨挥发累积量差异显著,这说明减少20%的化肥施肥量可以在保证水稻产量的同时,减少氨挥发排放量;T2与T4处理之间水稻产量无明显差异,但氨挥发累积量差异显著,这说明有机肥施用量越大,氨挥发排放量越大,但对当季水稻产量的增长影响不明显。T3处理的产量标尺小于T5,但水稻产量差异较大。与常规施肥处理CF相比,T1、T5及T6处理在保持水稻产量的同时,产生的氨挥发排放量分别减少了46.5%、39.0%、56.6%,这3个处理为较优施肥处理。

4 结论

(1)氨挥发主要发生在施肥后2~5 d内,穗肥期氨挥发损失占比最大,其次为分蘖肥期,基肥期损失最少。

(2)不同施肥处理的氨挥发总量存在较大差异,等量施氮条件下氨挥发损失占总施氮量比例为尿素>控释肥>有机肥+化肥>有机肥;不同施氮量条件下,施氮量越大氨挥发累积量越大。

(3)田面水NH_4^+-N浓度的变化是氨挥发速率的主要影响因素,氮肥量越高,田面水NH_4^+浓度越高,从而促进了稻田氨挥发的损失。

(4)综合氨挥发累积量和水稻产量,在洱海流域典型农区稻田种植中,有机肥与化肥配施(25%当季矿化率)、化肥减量施用(20%)以及控释肥施用是3种较优的环境友好型施肥方式。

表4 不同处理氨挥发累积量及水稻产量之间的比较

Table 4 Comparison between different treatments of ammonia volatilization accumulation and rice yield

处理 Treatments	水稻产量 Rice yield/ kg·hm^{-2}	氨挥发累积量 Ammonia volatilization accumulation/kg·hm^{-2}	产量标尺 Yield scale/ kg·t^{-1}
CK	4045±69e	11.12±0.16g	2.75±0.09c
CF	9978±291b	42.52±0.39a	4.26±0.13b
T1	9820±93b	22.73±0.23d	2.31±0.05d
T2	6458±539d	11.71±1.09f	1.81±0.47e
T3	8461±293c	15.12±0.08e	1.79±0.11e
T4	6878±379d	38.24±1.50b	5.56±0.17a
T5	9812±147b	25.95±0.53c	2.64±0.10c
T6	10 527±302a	18.44±0.44d	1.75±0.08e

注:同列中不同字母表示多重比较差异达到显著水平(P<0.05)。

Note: Different letters in the same column indicate significantly under the multiple comparison differences(P<0.05).

参考文献:

[1] 山 楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1858-1865.
SHAN Nan, ZHAO Tong-ke, BI Xiao-qing, et al. Ammonia volatilization from wheat soil under different nitrogen rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1858-1865.

[2] Heffer P. Assessment of fertilizer use by crop at the global level. 2006/07-2007/08[C]. International Fertilizer Industry Association, 2009.

[3] 孙祥鑫, 李东坡, 武志杰, 等. 持续施用缓/控释尿素条件下水田土壤NH_3挥发与N_2O排放特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6):1901-1909.
SUN Xiang-xin, LI Dong-po, WU Zhi-jie, et al. Characteristics of ammonia volatilization and nitrous oxide emission from a paddy soil under continuous application of different slow/controlled release urea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6):1901-1909.

[4] 金 洁, 杨京平. 从水环境角度探析农田氮素流失及控制对策[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3):579-582.
JIN Jie, YANG Jing-ping. Farmland nitrogen loss and its control strategies from the view of water environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3):579-582.

[5] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失[J]. 土壤学报, 2002, 39(增刊):12-25.
SHEN Shan-min. Contribution of nitrogen fertilizer to the development of agriculture and its loss in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(Suppl):12-25.

[6] 庄舜尧, 尹 斌, 朱兆良. 表面分子膜抑制稻田氨挥发的模拟研究[J]. 土壤, 2001(2):60-63.
ZHUANG Shun-yao, YIN Bin, ZHU Zhao-liang. Model research on the effect of surface film on ammonia volatilization from rice field[J]. *Soils*, 2001(2):60-63.

[7] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003(2):240-244.
SONG Yong-sheng, FAN Xiao-hui. Summanry of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2003(2):240-244.

[8] 朱 坚, 石丽红, 田发祥, 等. 典型双季稻田基施碳酸氢铵和尿素的氨挥发损失研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(2):83-88.
ZHU Jian, SHI Li-hong, TIAN Fa-xiang, et al. Ammonia volatilization loss from typical double-cropping paddy field with basal application of ammonium bicarbonate and urea[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(2):83-88.

[9] 田玉华, 贺发云, 尹 斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5):893-900.
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5):893-900.

[10] 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 Ping-ping, LIU Jin-jian, YANG Xiu-xia, 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.

[11] Pan 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.

[12] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 不同施肥土壤对尿素 NH_3 挥发的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2):76-79.
DONG Wen-xu, HU Chun-sheng, ZHANG Yu-ming. Effects of different soil fertilizations on NH_3 volatilization of urea[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2):76-79.

[13] Norman R J, Wilson C E, Slaton N A, et al. Nitrogen fertilizer sources and timing before flooding dry-seeded, delayed-flood rice[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(6):2184-2190.

[14] 黄慧君, 王永平, 李庆红. 洱海流域近50年气候变化特征及其对洱海水资源的影响[J]. 气象, 2013, 39(4):436-442.
HUANG Hui-jun, WANG Yong-ping, LI Qing-hong. Climatic characteristics over Erhai Lake basin in the late 50 years and the impact on water resources of Erhai Lake[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(4):436-442.

[15] 周 伟, 田玉华, 尹 斌. 太湖地区水稻追肥的氨挥发损失和氮素平衡[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1):32-36.
ZHOU Wei, TIAN Yu-hua, YIN Bin. Ammonia volatilization and nitrogen balance after topdressing fertilization in paddy fields of Taihu [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1):32-36.

[16] 王秀斌, 周 卫, 梁国庆, 等. 优化施肥条件下华北冬小麦/夏玉米轮作体系的土壤氨挥发[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):344-351.
WANG Xiu-bin, ZHOU Wei, LIANG Guo-qing, et al. Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from soil in winter wheat-summer corn rotation system in northern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2):344-351.

[17] Nastri A, Toderi G, Bernati E, et al. Ammonia volatilization and yield response from urea applied to wheat with urease(NBPT) and nitrification(DCD) inhibitors[J]. *Agrochimica*, 2000, 44(5/6):231-239.

[18] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同氮、磷处理对稻田田面水氮磷动态变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4):838-846.
SHI Ze-sheng, XU Yong-bo, LEI Bao-kun, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface waters of paddy soils in the northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):838-846.

[19] 薛欣欣, 吴小平, 张永发, 等. 控失尿素对稻田氨挥发、氮素转运及利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1):133-140.
XUE Xin-xin, WU Xiao-ping, ZHANG Yong-fa, et al. Effects of loss-controlled urea on ammonia volatilization, N translocation and utilization efficiency in paddy rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1):133-140.

[20] 邹 娟, 胡学玉, 张阳阳, 等. 不同地表条件下生物炭对土壤氨挥发的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1):348-354.
ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, et al. Effect of biochar on ammonia volatilization from soils of different surface conditions[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1):348-354.

[21] 贺发云, 尹 斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2):253-259.
HE Fa-yun, YIN Bin, JIN Xue-xia, et al. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2):253-259.