

缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发特性研究

胡小凤^{1,2}, 王正银^{1*}, 游媛¹, 李精超³

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 盘锦市农业技术推广站, 盘锦 124010; 3. 盘锦市环境科学研究院, 盘锦 124010)

摘要:采用“通气法”室内培养试验研究了非包膜缓释复合肥(SRF)在不同土壤水分条件下的氨挥发损失状况和动力学特性以及盆栽试验条件下水稻生长和氮素利用效率. 结果表明, SRF在淹水条件下氨挥发比不淹水处理提前3~4d到达峰值; 且峰值和累积氨挥发量也比不淹水培养条件下高. 与普通复合肥(CCF)相比, 缓释复合肥的氨挥发损失量显著降低, 不淹水条件下比等氮量CCF减少氨挥发50.6%和22.8%, 淹水条件下比等氮量CCF减少氨挥发24.2%和10.4%, 但是其氨挥发损失显著高于包膜缓释肥料(CRF). SRF的氨累积挥发量随施肥水平的增加而增大, 其动力学特性可用一级动力学方程、Elovich方程和抛物线扩散方程定量描述. SRF、CCF和CRF处理在淹水条件下的水稻植株生物量分别比不淹水条件增加67.86%、78.25%和48.75%; 氮素利用率分别比不淹水处理增加57.73%、80.70%和12.06%. 在不淹水和淹水2种土壤水分条件下, 施用SRF处理氮素利用率分别比CCF增加59.10%和10.40%. SRF能够降低氨挥发, 提高植株生物量和氮素利用率.

关键词:缓释肥料; 氨挥发; 通气法; 动力学特性; 土壤水分

中图分类号:X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2010)08-1937-07

Ammonia Volatilization of Slow Release Compound Fertilizer in Different Soils Water Conditions

HU Xiao-feng^{1,2}, WANG Zheng-yin¹, YOU Yuan¹, LI Jing-chao³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Station for Popularizing Agricultural Techniques Liaoning Panjin, Panjin 124010, China; 3. Environmental Science Research Institute Panjin, Panjin 124010, China)

Abstract: By using Venting method incubation experiment, we studied the ammonia volatilization and kinetics characteristics of uncoated slowed release compound fertilizer (SRF) under different soil water conditions and the growth and nitrogen utilization efficiency of rice in pot experiment. Results indicated that the ammonia volatilization of SRF under waterflooding reached the peak ahead of 3-4 days compared to the moist treatment. The peak and accumulation of ammonia volatilization in the waterflooding treatments were higher than those under the moist condition. SRF could significantly reduce total ammonia volatilization compared to the common compound fertilizer (CCF), reduced by 50.6% and 22.8% in the moist treatment and reduced by 24.2% and 10.4% in the waterflooding treatment, but the loss of ammonia volatilization of SRF was higher significantly than that of the coated fertilizer (CRF). Ammonia volatilization increased with the increasing of fertilizer application. The dynamics of ammonia volatilization of SRF could be quantitatively described with three equations: the first order kinetics equation, Elovich equation and parabola equation. Compared to moist condition, the biomass of rice plant in SRF, CCF and SRF treatments increased by 67.86%, 78.25% and 48.75%, and nitrogen utilization efficiency increased by 57.73%, 80.70% and 12.06% under waterflooding condition, respectively. Comparing with CCF, nitrogen utilization efficiency in SRF treatment improved by 59.10% and 10.40% under two soil moisture conditions. SRF could reduce ammonia volatilization and improve biomass and nitrogen utilization efficiency.

Key words: slow release fertilizer; ammonia volatilization; venting method; kinetics characteristics; soil moisture

我国是世界上氮肥使用量最大的国家^[1], 氮肥利用率仅为30%~35%, 损失却高达30%~50%, 其中氨挥发是氮肥气态损失的重要途径^[2]. 进入大气中的NH₃大部分通过干、湿表面吸附或溶解在雨水中很快从大气返回距NH₃挥发处相对较近的地表. 据Jenkinson估计, 大部分NH₃在大气中存留6d左右后返回地表, 10%~20%会被氧化成氮氧化物, 大部分含氮化合物随干湿沉降进入农田、森林、草原、江河、湖泊等, 引起土壤酸化和水体的富营养化^[3], 给环境带来巨大的影响. 提高氮肥利用率, 减

少氨挥发损失, 充分发挥氮肥增产效益, 是氮肥施用中亟待解决的问题^[4]. 缓/控释肥料能明显提高氮肥(肥料)利用率、减少施肥次数、减轻环境污染, 已成为国内外新型肥料研究的主要内容之一^[5~7]. 由于缓/控释材料的技术含量要求高、成本昂贵, 导致

收稿日期: 2009-10-09; 修订日期: 2010-02-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10); 科技部农业科技成果转化资金项目(2007GB2F100266); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2004AA246020)

作者简介: 胡小凤(1981~), 女, 博士, 主要研究方向为植物营养资源利用、植物营养与品质, E-mail: huxiaofeng81@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wang_zhengyin@163.com

现有缓/控释肥料产品成本高于普通化肥^[8],多应用于草坪和花卉等经济作物上,且部分包膜材料亦不能充分保障对环境无化学污染,而使其在农业生产上的应用受到限制^[9].近年来我国高浓度复合肥得到较快发展,无论是在施用总量上还是在化肥的占比上都有了显著提高,大大改善了我国化肥施肥结构^[10].尽管如此,化肥施入土壤中的氨挥发损失问题没有得到根本解决.因此,在评价各种含氮肥料(普通化肥和缓/控释肥料)的农业化学特性时,了解其氨挥发状况是一项重要的基础研究工作.

已有研究表明,施用缓/控释肥料能够显著降低氨挥发损失^[11,12].目前有关缓释肥料氨挥发特性的研究不多,而在不同土壤水分条件上的研究还未见报道.氨挥发是一个复杂的物理化学反应过程,是受许多环境因子和土壤因素决定的,因此在环境因子相对一致的条件下(温度、湿度等),采用数学建模方法,利用培养条件来研究缓释肥在不同土壤中氨挥发过程具有十分重要的意义.本研究采用室内培养试验和水稻盆栽试验,分析了一种新型非包膜缓释复合肥料在土壤中氨挥发损失状况,探讨了施肥水平、不同土壤水分条件下的氨挥发损失量及其动力学特性和对水稻生长和氮素利用的影响,以期为进一步改善缓释复合肥料的性能、减少氨挥发、提高氮素利用率提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

缓释复合肥(SRF)系西南大学研制的一种以优质有机肥为基础的有机-无机非包膜养分结构型缓释肥料^[13],养分含量为15:7:12,其中氮素养分由铵态氮、硝态氮、酰胺态氮、有机氮等形态~.普通复合肥(CCF):尿素(N, 46%)、磷酸二氢铵(N, 10%; P_2O_5 , 44%)、氯化钾(K_2O , 60%)按15:7:12养分比例混合造粒而成. Multicote(“魔力康”, CRF):聚合物包膜缓控释复合肥(15:15:15),为以色列海法化学工业公司生产,氮素养分为铵态氮3.5%、硝态氮4.0%、酰胺态氮7.5%,肥料颗粒直径为2~4 mm, pH为6.2.

供试土壤为紫色母岩发育的石灰性紫色土, pH 8.0, 有机质 $22.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $99.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $14.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效钾 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1.2 试验方法

1.2.1 室内培养试验

(1) 试验设计 主处理为淹水培养和不淹水培

养2个处理,每个主处理设缓释肥(施用氮肥水平为 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 用SRFI、SRF II表示),普通复合肥(施用氮肥水平为 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 用CCFI、CCF II表示),包膜肥(施用氮肥水平为 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 用CRFI、CRF II表示),对照(不施肥, CK),共14个处理,每个处理3次重复.

(2) 试验装置 通气法氨挥发吸收装置^[14],该装置为直径15 cm、高15 cm塑料桶和2层海绵,分别将2块厚度均为2 cm、直径为16 cm的海绵均匀浸以15 mL的磷酸甘油溶液(50 mL磷酸、40 mL丙三醇,定容至1 000 mL)后,置于硬质塑料桶中,下层的海绵距桶底5 cm,上层的海绵与桶顶部相平.内层海绵用于吸收样品挥发的 NH_3 ,外层海绵防止外界气体污染.

(3) 试验步骤 将供试土壤风干、磨碎过1 mm筛,每个处理土壤500 g并加入相应肥料和水,不淹水处理达到田间持水量的80%(土壤含水量约16%);淹水培养维持水面高于土层2 cm,根据重量法每周补水一次.将通气法装置中下层的海绵分别装500 mL的塑料瓶中,加 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl溶液300 mL,使海绵完全浸于其中,振荡1 h,浸取液中的铵态氮用蒸馏法测定.取样时,将通气装置下层的海绵取出,同时换上另一块刚浸过磷酸甘油的海绵,上层的海绵视其干湿情况3~7 d更换1次.试验期间温度为 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$,保持每天温度变化基本一致.前10 d每天取样一次,第2、3周视测得的氨挥发数量多少每1~4 d取样一次,以后取样间隔延长到7~14 d.

(4) 动力学研究 将不同培养时段测定的氨挥发量,采用一级动力学方程 $[N_t = N_0(1 - e^{-kt})]$ 、Elovich方程 $(q_t = a + b \ln t)$ 和抛物线扩散方程 $(q_t = a + bt^{0.5})$ 进行氨挥发的动力学研究,以期定量描述缓释肥料的氨挥发过程.

1.2.2 盆栽试验

水稻盆栽试验于2008年4~6月在西南大学玻璃温室进行.试验共设8个处理.主处理为淹水和不淹水栽培2个处理,每个主处理设缓释复合肥(SRF),包膜肥(CRF),普通复合肥(CCF),不施肥(CK),每个处理3次重复,施氮肥水平为 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.试验采用 $15\text{ cm}\times 18\text{ cm}$ 的塑料盆,每盆装土2.5 kg.每盆留2株水稻.肥料一次性基施.淹水处理维持水面高于土层2 cm.不淹水处理含水量为田间持水量(土壤含水量约20%),为保持水分一致

性,采用半自动毛细灌溉法.具体方法为在盆的底边(在盆侧与底的连接处)上打8个直径约0.5 cm的孔,然后在底部塞满厚约1 cm的脱脂棉,加水湿润并压紧在杯的底部挡住小孔,以使土壤不能从盆中漏出.土壤与肥料混匀后将塑料盆放入100 cm×20 cm大盆子中,维持大盆子中始终有2 cm高度的水层,通过脱脂棉的毛细管作用将水自动导入土壤中进行灌溉,水稻生长70 d时取样测定.称鲜重,同时将茎叶烘干后测定其植株全氮含量,取3个重复的均值作为分析数据.

1.3 土壤基本农化性状测定

土壤基本农化性状按常规分析方法测定^[15].

1.4 数据处理

肥料氮素利用率用以下公式计算:

$$NUE = (\text{施肥处理水稻植株全氮量} - \text{不施肥处理水稻植株全氮量}) / \text{施入总氮量}$$

采用SPSS和Excel统计软件分析.

2 结果与分析

2.1 缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发动态

态变化

不淹水培养条件下,无论是高氮还是低氮水平,施肥后10 d内SRF氨挥发变化趋势与CCF处理较为一致,都是先增大到达一个小峰值后再减小后又增大再逐渐降低,且其氨挥发量始终低于CCF处理[图1(a)和1(c)].施氮量不同,SRF到达峰值的时间不同,SRF I第6 d达最大峰值,为 $1.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图1(a)],SRF II第5 d达峰值,为 $6.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图1(c)].而CRF处理在施肥后10 d内没有明显氨挥发,挥发量与不施肥处理相近.

淹水培养条件下,SRF氨挥发变化趋势与CCF处理一致,都为第2 d达到峰值再逐渐减小,且其氨挥发量始终低于CCF处理[图1(b)和1(d)].SRF I峰值为 $4.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图1(b)],SRF II峰值为 $10.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图1(d)].淹水条件下比不淹水条件下提前3~4 d达到峰值,且相同施氮量条件下,淹水处理中SRF氨挥发峰值均大于不淹水培养处理.这可能与SRF在淹水条件下水解速度大于不淹水条件下有关.而CRF处理与旱作培养条件下相似,在施肥后10 d内氨挥发量极少.

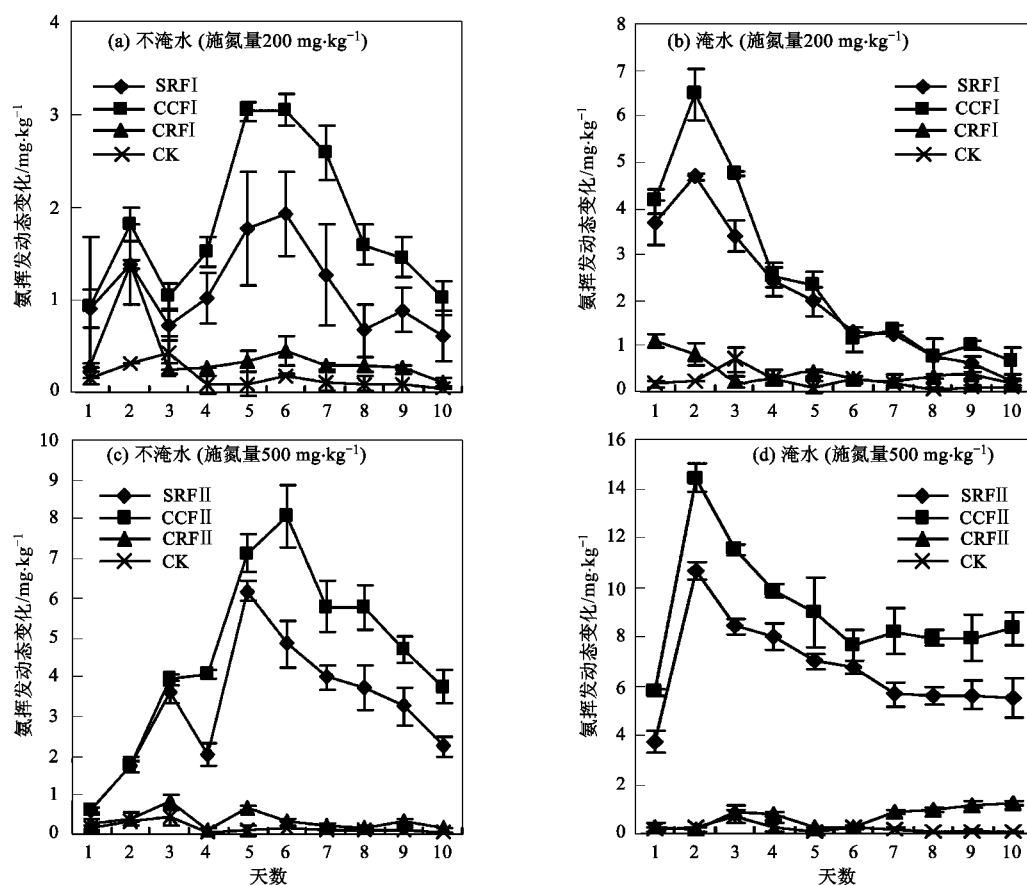


图1 氨挥发动态变化

Fig. 1 Patterns of ammonia volatilization

2.2 缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发累积量

不同处理在 2 个土壤水分条件下 70 d 的氨累积挥发量均随时间的延长而增大,在不同土壤水分条件下各处理氨挥发累积量为 $CCF > SRF > CRF > CK$ (图 2). 随着 SRF 施肥水平的增加,氨累积挥发量呈增加趋势,SRF I 比 SRF II 减少氨挥发效果更加明显.

不淹水培养条件下[图 2(a)和 2(c)]不施肥处理 CK 的累积挥发量为 $8.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,缓释复合肥料 SRF I 和 SRF II 分别为 $16.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $56.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,普通复合肥 CCF I 和 CCF II 的累积挥发量分别为 $24.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $70.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,包膜肥料 CRF I 和 CRF II 的累积挥发量分别为 $8.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $21.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,来自肥料的表观挥发量(施肥处理减去对照)依次为 SRF I $7.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、SRF II $48.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CCF I $16.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CCF II $62.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CRF I $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 CRF II $12.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. SRF 氨挥发量分别占施氮量的 4.0% 和 9.6%,比等氮量 CCF 减少氨挥发 50.6% 和 22.8%.

淹水培养条件下[图 2(b)和 2(d)],SRF I 和 SRF II 随时间延长氨累积挥发量曲线变化趋势有所

不同,SRF I 随时间延长累积挥发量前 5 d 增加幅度较大,后曲线趋于平缓,而 SRF II 随时间的延长氨累积挥发量呈线性持续增加至 28 d 时曲线趋于平缓. 而淹水条件下 SRF 累积挥发量明显高于旱作条件下. © 肥处理的表观挥发量依次为:SRF I $15.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、SRF II $143.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CCF I $20.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CCF II $159.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、CRF I $0.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 CRF II $35.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,SRF 氨挥发量分别占施氮量的 7.61% 和 28.6%,比等氮量 CCF 减少氨挥发 24.2% 和 10.4%. 随着 SRF 施肥水平的增加,氨累积挥发量呈增加趋势,SRF I 比 SRF II 减少氨挥发效果更加明显. 施氮量为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,淹水培养条件下 SRF 累积挥发量明显高于不淹水处理[图 2(c)和 2(d)]. 而施氮量为 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,SRF 在 2 个土壤水分下累积挥发量差异不大[图 2(a)和 2(b)]. 随施氮水平增加,SRF 在淹水条件下累积挥发量增加幅度较不淹水条件下大.

2.3 缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发动力学特性

70 d 的试验结果表明,不同处理随时间变化的挥发累积量分别用一级动力学方程 $[N_t = N_0(1 -$

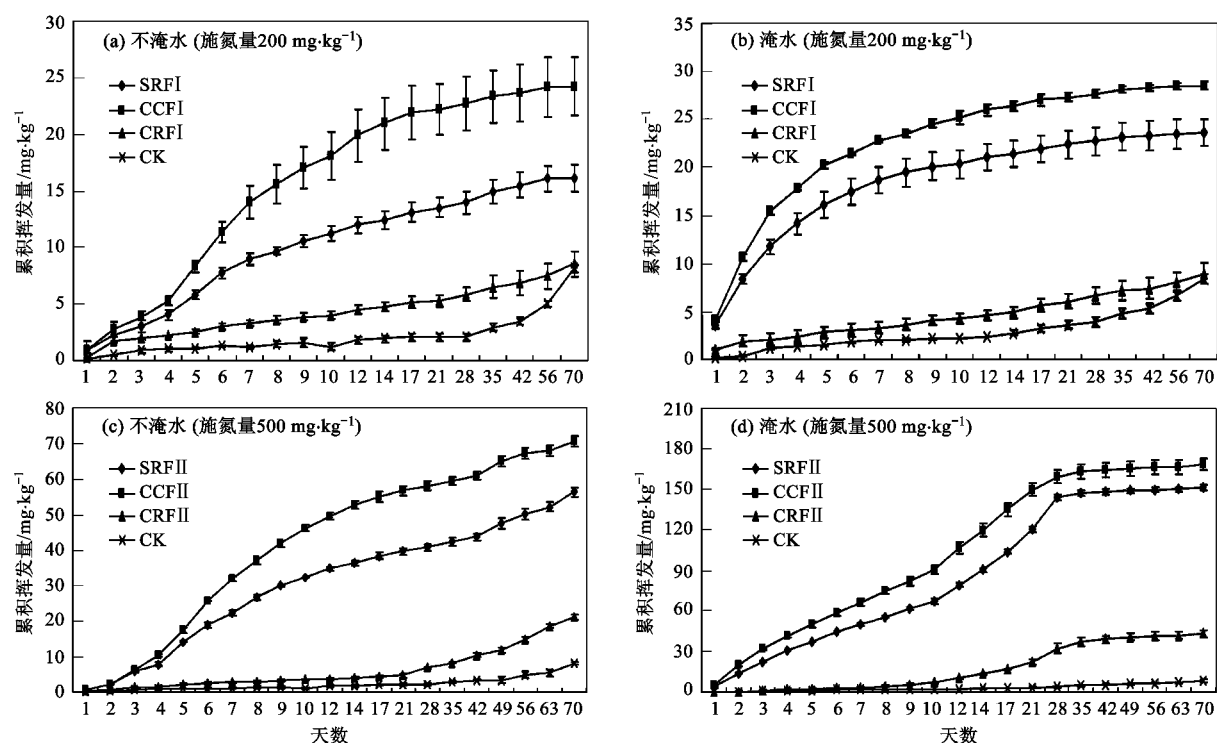


图 2 氨累积挥发量

Fig. 2 Accumulation of ammonia volatilization

e^{-kt})]、Elovich 方程($q_t = a + b \ln t$)和抛物线扩散方程($q_t = a + bt^{0.5}$)进行的拟合结果(表 1),均获得了很好的拟合度.各式中 t 代表培养时间, N_t 和 q_t 代表氨挥发量, N_0 表示最大氨挥发量, a 代表第 1 d 氨挥发量, k 和 b 为氨挥发速率即单位时间内的氨挥发量.

一级动力学方程拟合的 SRF 的氨最大释放量 N_0 均小于等氮量的 CCF,这与它们各自的累积量大

小一致.无论施肥量高低,淹水条件下 SRF 的氨最大释放量 N_0 和氨释放速率常数 k 均大于不淹水时.在 Elovich 方程和抛物线扩散方程中,参数 b 为斜率,可以用来表征不同条件下氨的挥发速率.比较 b 值可以发现,无论施氮量高低,SRF 的氨挥发速率均小于等氮量的 CCF.淹水培养条件下 SRF 的氨挥发速率大于不淹水.

表 1 不同土壤水分条件下氨挥发动力学参数
Table 1 Kinetic parameters of ammonia volatilization under different moisture

土壤水分	处理	一级动力学方程 $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$				Elvoich 方程 $q_t = a + b \ln t$				抛物线扩散方程 $q_t = a + bt^{0.5}$			
		N_0	k	r	SE	a	b	r	SE	a	b	r	SE
不淹水	SRF I	16.12	0.121 1	0.958 2**	0.723	0.257 0	4.155	0.972 7**	1.16	2.160	2.098	0.799 8**	2.24
	CCF I	24.23	0.130 7	0.940 3**	0.947	0.001 2	6.672	0.948 1**	2.63	3.352	3.290	0.851 4**	4.33
	CRF I	8.600	0.078 2	0.915 0**	0.690	-0.138 3	1.868	0.991 4**	0.290	0.446 8	1.014	0.980 2**	0.435
	SRF II	56.58	0.084 1	0.847 9**	1.17	-4.414	13.90	0.977 9**	3.64	6.952	1.931	0.930 6**	6.36
	CCF II	70.68	0.100 0	0.861 7**	1.31	-5.307	18.78	0.965 9**	6.15	4.097	9.192	0.899 6**	10.4
	CRF II	21.20	0.084 4	0.926 3**	0.767	-4.546	4.272	0.862 3**	3.07	-4.036	2.485	0.954 4**	1.81
	CK	9.080	0.052 7	0.904 9**	0.553	-1.056	1.341	0.838 0**	1.07	-0.868 3	0.773 4	0.919 5**	0.769
淹水	SRF I	23.62	0.110 1	0.955 6**	0.680	7.890	4.529	0.927 9**	2.14	10.67	2.100	0.783 4**	3.56
	CCF I	28.58	0.119 8	0.946 8**	0.747	10.10	5.373	0.918 7**	2.71	13.50	2.465	0.767 4**	4.40
	CRF I	9.100	0.071 2	0.963 4**	0.396	0.038 3	1.952	0.983 0**	0.428	0.594 8	1.074	0.985 4**	0.396
	SRF II	151.7	0.120 8	0.958 7**	0.800	-21.72	42.92	0.975 9**	11.7	-4.863	22.13	0.957 3**	15.5
	CCF II	168.3	0.117 5	0.953 9**	0.825	-12.09	45.99	0.977 5**	12.1	8.665	23.06	0.932 7**	20.7
	CRF II	43.48	0.129 5	0.962 4**	0.816	-15.54	13.12	0.926 6**	6.51	-12.50	7.276	0.977 7**	3.64
	CK	8.67	0.067 5	0.926 6**	0.612	-1.292	1.827	0.944 6**	0.776	-0.854 0	1.010	0.993 1**	0.276

2.4 缓释复合肥在不同土壤水分条件下对水稻生长和氮肥利用率的影响

从表 2 可知,◎ 肥处理在淹水条件下的生物量均明显大于旱作,表明不淹水对水稻生长有一定的水分胁迫负效应,淹水条件更有利于水稻生长.无论不淹水还是淹水处理,SRF 生物量均显著大于 CCF;不淹水条件下 SRF 生物量与 CRF 间差异不显著;淹水条件下,SRF 生物量显著大于 CRF.◎ 肥处理在不淹水条件下植株含氮量明显大于淹水条件,这可能是由于淹水条件下生物量较不淹水时大,产量的稀释效应造成.无论不淹水还是淹水处理,SRF 植株含氮量显著大于 CCF 和 CRF;不淹水条件下 CCF 与 CRF 间的差异不显著,淹水条件下 CCF 显著大于 CRF.淹水条件下◎ 肥处理的氮肥利用率明显高于不淹水时,进一步表明淹水条件有利于水稻生长及其对氮肥的吸收利用.无论不淹水还是淹水条件,SRF 处理水稻植株氮肥利用率均显著大于 CCF,不淹水条件下比 CCF 高出 21.48%,淹水条件下高出 27.68%,表明 SRF 与普通复合肥相比,确实能够减少氮肥养分损失,提高氮肥利用率.

表 2 不同土壤水分条件下缓释复合肥对水稻生长和氮素利用率的影响¹⁾

Table 2 Effect of SRF on rice growth and nitrogen use efficiency under different soil moisture

土壤水分	处理	茎叶鲜重 /g·pot ⁻¹	植株含氮量 /%	氮肥利用率 /%
不淹水	SRF	27.99a	3.72a	30.81
	CCF	17.75b	2.93b	9.33
	CRF	29.40a	2.99b	23.11
淹水	SRF	86.96a	2.50a	53.96
	CCF	57.37c	2.37b	26.28
	CRF	81.62b	2.09c	48.35

1)数据后不同小写字母分别表示处理间差异达 5% 显著水平

3 讨论

对旱地土壤而言,氨挥发直接通过土面进行;而在淹水条件下,氨挥发发生在水层与大气的界面处.水层与大气中氨浓度差越大,氨挥发越多^[2].本研究中不同土壤水分条件下,无论施肥量高低,SRF 氨挥发动态变化淹水培养处理比旱作处理提前 4 d 到

达峰值;累积挥发量也比旱作培养条件下高.这可能是由于淹水条件下土层水中铵离子浓度较不淹水处理土壤溶液中的铵离子浓度高,从而促进氨挥发.而造成这种现象的原因一方面可能为 SRF 施入淹水土壤中后水解度较大,造成表面水铵离子浓度增加,另一方面可能是 SRF 颗粒比重小于水,在水压的作用下在淹水土壤中向土层上方移动,使水层中的铵离子浓度增加,pH 值上升,从而导致大量氨挥发.此外,在不淹水条件下土壤中氮素存在硝化作用,使氨分压(浓度)降低,从而使其氨挥发量低于淹水条件.

在 2 种土壤水分条件下,无论施肥水平高低,本研究与普通复合肥相比,缓释复合肥的氨挥发损失量显著降低,减少因施肥造成的氮肥损失,但是其氨挥发损失显著高于包膜肥料.这与不同肥料具有不同的氮素形态和不同养分释放过程有关.CCF 中的氮肥为尿素,氮素形态为酰胺态氮,施入土壤后在土壤脲酶的作用下便很快水解,产生铵离子释放大氮素,并很快与土壤、水结合,较快速度形成很高的氨分压,导致大量氨气挥发出来^[16].缓释复合肥施入土壤后也有比较明显的氨挥发,这与其存在不同溶解度的氮素形态矿化快慢差异有关.而以化学、生物为主要控释机理的非包膜缓释肥料中含有一小部分无机氮(铵态氮),施入土壤后,这部分无机氮首先释放出来,同时也会存在氨挥发,而其余的氮素为多形态的有机氮,需要在土壤微生物的作用下经过一定时间才能被矿化.高分子聚合物包被的包膜肥料可能由于其养分释放期存在滞后期、线性期和衰减期有关^[17~19].包膜材料阻隔膜内尿素与土壤脲酶的直接接触及阻碍膜内尿素溶出过程所必需的水分运移,减少了参与氨挥发的底物尿素态氮,也是降低土壤氨挥发的重要因素^[11].但是也不可否认,非包膜缓释复合肥在减少氨挥发损失方面与包膜缓释肥还有一定差距.大量研究表明,氮肥施肥水平越高,氨挥发损失越大^[20,21],本研究也得到类似结果,不同施肥水平下,氨挥发累积量随施肥水平的增加而增加.

水稻是沼泽植物,对水分要求较高,抗旱能力较低^[22].水分对水稻的生长起着至关重要的作用.虽然有的研究表明,在轻度水分胁迫下,对水稻产量和生长发育不大^[23].本试验中与淹水条件相比,不淹水处理降低了水稻生物量和氮素利用率.本研究的目的在于考察 SRF 在淹水和不淹水条件下的氨挥发特性和对水稻氮素利用率的影响,所以水稻盆栽

试验不淹水处理中,水稻是处于持续水分胁迫条件下,包括移栽期和返青期,即使是轻度水分胁迫,也影响了水稻的生长发育,降低了氮素利用率.另一方面,适宜水稻生长的土壤 pH 值范围为 5.5~6.5,而本试验中供试土壤为 pH 值 8 的石灰性紫色土是不适宜水稻生长的(在四川盆地种植水稻的石灰性紫色土在 130 万 hm^2 以上^[24]),而若在淹水条件下,大多数土壤的酸碱度有向中性变化的趋向,使碱性土的 pH 降低.这是因为淹水还原条件下的连锁反应,引起了很多物质的水解和水化作用的加强,也产生了较多的还原性物质以及多量的 H_2CO_3 等具有缓冲作用,因而大大平衡了土壤溶液的 pH^[25].所以虽然在培养试验中,淹水处理的氨累积挥发量明显高于旱作,但是在水稻盆栽试验中发现,淹水处理中的水稻生长状况和氮素利用率还是高于不淹水.无论是不淹水还是淹水处理,SRF 氮素利用率显著大于 CCF,这也从另一方面表明 SRF 的氮素损失小于 CCF.

本研究是对一种新型缓释复合肥料在不同土壤水分条件下氨挥发特性的初步探索,方法也主要为室内培养和盆栽生物试验,今后在此基础上将进一步研究田间种植作物条件下不同土壤水分对缓释复合肥料氨挥发、作物生长和氮素利用效率的影响,为更全面评价供试缓释复合肥料氨挥发特性和大田推广应用该新型肥料提供理论依据.

4 结论

(1)不同土壤水分条件下,无论施肥量高低,缓释复合肥氨挥发动态变化淹水处理比不淹水处理提前 4 d 到达峰值,氨累积挥发量也比不淹水培养条件下高.

(2)与普通复合肥相比,缓释复合肥的氨挥发损失量显著降低,可大大提高肥料利用率,并减少施肥造成的氮素损失,但是其氨挥发损失明显高于包膜肥料.

(3)缓释复合肥随时间变化的氨挥发累积量用一级动力学方程 $[N_t = N_0(1 - e^{-kt})]$ 、Elovich 方程 $(q_t = a + b \ln t)$ 和抛物线扩散方程 $(q_t = a + bt^{0.5})$ 能很好地拟合,根据这些模型可在给定时间内预测缓释复合肥的氨挥发量.

(4)在淹水条件下水稻植株生物量和氮素利用率均大于不淹水处理,2 种土壤水分条件下缓释复合肥处理氮素利用率均显著高于普通复合肥.

参考文献:

- [1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.
- [2] 李鑫,巨晓棠,张丽娟.不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J].应用生态学报,2008,19(1):99-104.
- [3] Jenkinson D S. An introduction to the global nitrogen cycle[J]. Soil Use Manage,1990,6(1):56-61.
- [4] Hayashi K,Nishimura S,Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. Sci Total Environ,2008,390:485-494.
- [5] Elizabeth A G. Preplant slow-release nitrogen fertilizers produce similar bell pepper yields as split applications of soluble fertilizer[J]. Agr J,2000,92:388-393.
- [6] 肖强,张夫道,王玉军,等.纳米材料胶结包膜缓/控释肥料特性及对作物氮素利用率与氮素损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(4):779-785.
- [7] Li J Y, Hua Q X, Tan J F, *et al.* Mineral coated fertilizer effect on nitrogen—use efficiency and yield of wheat [J]. Pedosphere, 2005, 15(4):526-531.
- [8] 张民,史衍玺,杨守祥,等.控制和缓释肥的研究现状与进展[J].化肥工业,2001,28(5):27-30.
- [9] 孙克君,卢其明,毛小云,等.复合控释材料的控释性能、肥效及其成膜特性研究[J].土壤学报,2005,42(1):127-133.
- [10] 赵献兵,梁斌.复合肥行业面临发展机遇[J].中国农资,2008,12:70.
- [11] 孙克君,毛小云,卢其明.几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J].应用生态学报,2004,15(12):2347-2350.
- [12] 郑圣先,刘德林,聂军.控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J].植物营养与肥料学报,2004,10(2):137-142.
- [13] 王正银,叶学见,叶进,等.绿色控释多养分肥料生产方法[J].中华人民共和国国家知识产权局发明专利公报,2005,21(1):162.
- [14] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等.田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):205-209.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].(第三版).北京:中国农业出版社,2000.56-109,263-271.
- [16] Robette P, Angers D A, Chantigny M H, *et al.* Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison[J]. Soil Till Res,2009,103:310-315.
- [17] Shaviv A, Mikkelsen, R L Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation-A review [J]. Fertil Res, 1993,35:1-12.
- [18] Shaviv A, Smadar R. Zaidel E. Model of diffusion release from polymer coated granular fertilizers[J]. Envir Sci Tech, 2003,37:2251-2256.
- [19] 杜昌文,周健民,王火焰,等.聚合物包膜 NPK 复合肥料养分释放滞后期的研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(2):179-182.
- [20] 吴萍萍,刘金剑,杨秀霞.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.
- [21] Lin D X, Fan X H, HU F, *et al.* Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu lake region, China [J]. Pedosphere, 2007,17(5):639-645.
- [22] 王成瑗,王伯伦,张文香,等.土壤水分胁迫对水稻产量和品质的影响[J].作物学报,2006,32(1):131-137.
- [23] 李华,王冬吟,朱德峰.土壤水分状况对水稻物质积累和产量的影响[J].西南农业学报,2008,21(1):114-116.
- [24] 四川省农牧厅,四川省土壤普查办公室.四川土种志[M].成都:四川科学技术出版社,1995.523-719.
- [25] 桑以琳.土壤学与农作学[M].北京:中国农业出版社,2005.27,189.