

长效碳酸氢铵理化特性及增产机理的研究*

张志明 李继云 ** 冯元琦 *** 毕庶春 伍蔚民 ****

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

摘要 在碳酸氢铵(下称普通碳铵)生产过程中, 定量加入一种有机化合物 DCD (下称氨稳定剂), 形成共结晶型新肥种, 称之为长效碳酸氢铵(下称长效碳铵). 其特点是: 减缓直接挥发损失率 47%; 肥效期由 35~45 d 延长到 90~110 d; 氮素利用率提高 5.9~10.2 个百分点; 在同等产量水平下可节肥 20%~30%; 在等氮量施肥条件下增产率为 10%, 常显示出有促进作物早熟功能. 可作基肥 1 次施入, 为免中耕、覆膜和节水农业提供了节约劳力而增产的肥料.

关键词 碳酸氢铵 长效碳酸氢铵 DCD 氮素利用率 共结晶

1 现状与依据

提高化肥氮素利用率研究有 3 条途径: (1) 添加硝化抑制剂, 有 30 余年的研究历史, 先后在世界各国共推出 17 种专利产品^[1~3], 其中用量最多的是 Cp, 美国、原苏联、加拿大均大量应用; (2) 添加脲酶抑制剂, 使用对象为尿素, 世界各国先后推出约有 100 多项专利^[4], 我国推广的脲酶抑制剂氨脲就属此类, 它对脲酶的抑制率高达 67%; (3) 应用包被技术, 世界应用最早的是脲甲醛, 随后是硫衣包膜, 丁烯叉二脲和异丁叉二脲及最近推出的草酰胺. 美国近期提出用乙烯薄膜包被化肥, 可控制化肥释放^[5]. 我国广州氮肥厂和中国科学院石家庄农业现代化研究所联合研制的包被尿素及中国科学院南京土壤研究所研制的钙镁磷肥包被普通碳铵均属此类^[6~9]. 而中国科学院沈阳应用生态研究所研制的用 DCD 作氨稳定剂直接抑制氨的挥发, 颇具新意, 在理论上有创造性贡献, 而用于普通碳铵上, 符合我国国情. 研究过程中发现 DCD 是一种较理想的铵离子稳定剂, 并在施用剂量和生产工艺上有突破性进展, 达到了世界该领域研究的前沿.

本世纪初, 德国科学家就发现了 DCD 有抑制土壤中铵态氮的硝化作用^[10], 但 60 多年来一直进展缓慢. 1970 年日本人发现 DCD 有延长氮肥肥效作用, 以后一些国家对 DCD 的作用进行了大量研究, 将其与硫酸铵、尿素同时施入土壤, 测定氮肥以气体形式的损失量减少了

1995-10-13 收稿, 1996-02-15 收修改稿

* 中国科学院院长基金支持项目

** 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

*** 化学工业部经济技术委员会, 北京 100723

**** 国家科学技术委员会, 北京 100036

1/3, 而土壤中以有机物形态固定的数量几乎增加1倍。以后又发现DCD的抑制作用可以维持80 d。近年来印度、澳大利亚、意大利等国也进行了大量的田间试验, 认为可提高氮素利用率20%, 增加小麦等作物产量10%左右。我国70年代初对DCD已经开始研究^[11~13], 上海化工研究院、福建农业科学院、中国科学院林业土壤研究所曾进行了大量的工作^[14], 证明DCD对亚硝化细菌有较强的抑制作用, 为我国普通碳铵改性研究提供了重要依据。长效碳铵的生产工艺合理, 是目前我国碳铵改性较为理想的途径。可以避免加工、使用过程中氨的挥发, 对增产增收效益明显, 在全国不同土壤类型、不同作物的区域性试验证明, 长效碳铵挥发性减少, 氮素利用率提高, 肥效期延长。达到大面积预期的增产目的。

2 材料与方法

2.1 材料

依据长效碳铵发明专利的剂量与方法, 生产的长效碳铵作试料, 选用有代表性的普通碳铵、尿素和硫酸铵常用化肥品种作对照, 进行化肥稳定性和肥效试验。

2.2 方法

2.2.1 长效碳铵结构研究 将长效碳铵和普通碳铵直接放在扫描电子显微镜样品载物台上, 用电子束照射轰击, 使试样表面局部受高真空及电子束同时的作用, 促使样品表面升华, 进行动态拍摄, 可看出DCD的存在状态。

2.2.2 长效碳铵损失量研究 将长效碳铵和普通碳铵置于常温下, 裸露在外, 使其自由挥发; 或置于较高温度下(43℃)使其快速挥发, 分别测其挥发损失量。

2.2.3 长效碳铵稳定性研究 (1) 将长效碳铵与普通碳铵按1:200的肥土比均匀地混拌于土壤中, 夏季置于室外, 测定土壤中铵态氮和硝态氮的贮存量。(2) 在室内密封条件下, 将土壤用氯仿灭菌, 抑制硝化细菌活性, 测定土壤中氨态氮的挥发量和铵态氮的贮存量。

2.2.4 长效碳铵氮素利用率研究 盆栽试验, 供试作物水稻, 5次重复, 2个处理: 长效碳铵、普通碳铵各施 $0.2 \text{ gN} \cdot \text{kg}^{-1}$, 每盆装干土12.5 kg, 化肥于装土时1次施入。小区试验, 供试作物玉米, 4次重复, 共5个处理: 对照, 长效碳铵亩施40, 50 kg, 普通碳铵亩施40, 50 kg, 随机排列。试验地为中等肥力棕壤, 土壤化学性质: 有机质 $1.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.39, 全氮 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $67.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $8.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $21.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $98.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。进行不同处理的氮素利用率测定和显著性分析。

2.2.5 长效碳铵延长肥效期研究 (1) 在玉米播种时将长效碳铵作基肥, 作物生长期间不再追肥; (2) 将普通碳铵2次施肥。处理一为2/3作基肥, 1/3作追肥; 处理二为1/3作基肥, 1/3作前期追肥, 1/3作后期追肥。施肥量均为每亩75 kg, 随机排列, 3次重复。进行方差分析和肥效期的预测。

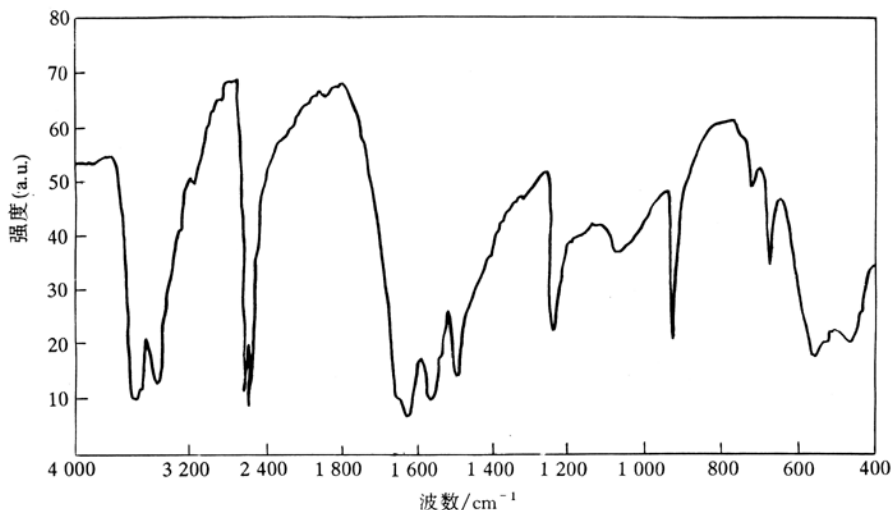
3 结果与讨论

3.1 长效碳铵的结晶

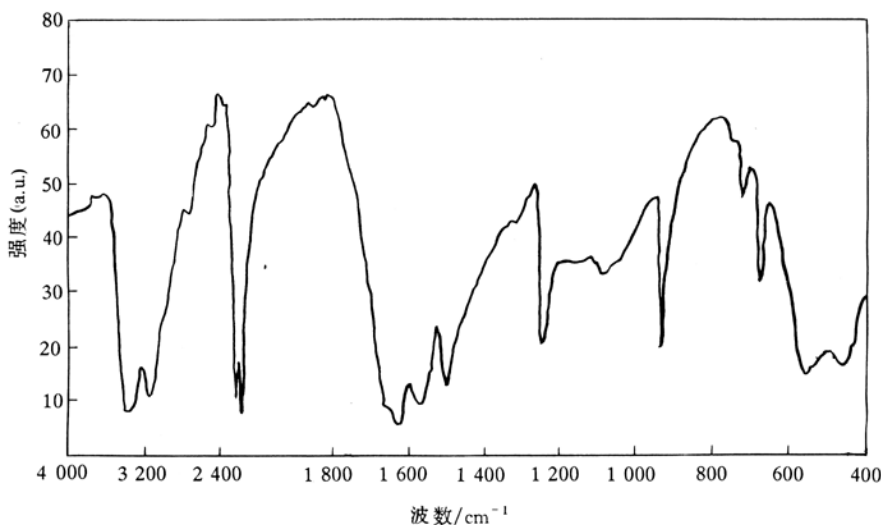
在光学显微镜下可看出: 长效碳铵结晶体多呈棒状($\varnothing 0.25 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$)近方形($\varnothing$

0.46 mm × 0.57 mm × 0.5 mm) 和小的结晶体,崩解破碎晶体较少,而普通碳铵崩解破碎较多,且多聚集在大晶体的表面上,表现出长效碳铵晶体的紧实度较强。

应用扫描电镜在 10 kV 加速电压,以电子束对长效碳铵的浅层照射轰击所产生的蚀刻作用,使其表层碳铵分解挥发,可以直接观察到隐现在长效碳铵不同界面下的片状六角菱形的 DCD 结晶,结晶大小约为 (0.02 ~ 0.08) mm × (0.02 ~ 0.04) mm × (0.003 ~ 0.005) mm,而在长效碳铵结晶体之外未发现有游离散在的 DCD 存在。对长效碳铵样品作分解,挥发处理使 DCD 的六角菱形的结晶全部暴露出来,作红外光谱分析,其图谱与原料 DCD 相同,说明长效碳铵与 DCD 形成结晶的过程是一种物理过程,DCD 性质未发生任何变化(见图 1)。



(a)



(b)

图 1 原料 DCD 与长效碳铵中 DCD 菱形结晶的红外光谱谱图比较

(a) 长效碳铵中片状六角菱形晶体, (b) 从鞍山购置的 DCD 原料

3.2 长效碳铵在不同温度下的挥发损失

普通碳铵的易挥发性和不耐贮存是其最大缺点,工厂生产的普通碳铵必须当年生产当年销售,农民也是当年购买当年用,而长效碳铵由于稳定剂的作用可以减缓挥发以增加耐贮性(见表 1)。从表 1 的试验结果看出,普通碳铵在裸露通风条件下挥发损失很快,在 12~16℃ 的温度下最长贮存时间为 58 d,随着存放温度升高,贮存时间亦缩短,当温度为 43℃ 时,在 7 d 之内则全部挥发;而长效碳铵的贮存稳定性则大大增强,在 12~16℃ 条件下贮存时间可延长到 122 d,比普通碳铵延长了 64 d,减少挥发损失率 48%。随存放温度升高,贮存时间亦缩短,但其挥发损失率比普通碳铵平均减少 47%。由于长效碳铵在受热条件下稳定性和耐贮存性的增强,表明 DCD 可以改善普通碳铵基本理化性质。

表 1 长效碳铵与普通碳铵在不同温度条件下挥发损失率^{a)}

处理	温度 /℃	不同时间挥发率/%								
		1	3	5	10	20	50	100	120	天数/d
长效 碳铵	12~16	1.91	3.30	6.65	8.47	17.30	41.60	82.20	98.40	(100/122 d)
	20	5.47	13.07	24.06	38.01	77.67	(100/26 d)			
	32	8.29	16.75	27.43	51.35	(100/21 d)				
	43	12.00	28.05	39.81	69.21	(100/17 d)				
普通 碳铵	12~16	3.07	6.48	10.65	18.01	35.46	86.61	(100/58 d)		
	20	9.60	25.26	46.12	80.52	(100/13 d)				
	32	15.57	34.69	67.93	(100/10 d)					
	43	27.95	46.00	71.50	(100/7 d)					
长效碳铵为 普通碳铵挥发率 /%		52 (12~16℃) 50 (20℃) 52 (32℃) 58 (43℃) 平均 53								

a) 选 22 个厂家的产品试验后统计; 相关系数 $\gamma=0.614\sim0.999\ 8$

3.3 长效碳铵在土壤中的稳定性

碳酸氢铵的损失途径除了直接气化损失以外,施入土壤中的不稳定性是第二大损失途径。普通碳铵在土壤中与水接触后,会分解成氢氧化铵、二氧化碳和水,氢氧化铵又进一步分解成氨和水。长效碳铵由于加入稳定剂 DCD,能增加铵离子在土壤胶体、土壤粘粒上的吸附强度;由于 DCD 是一种硝化抑制剂,可以减少和延缓土壤中硝态氮的形成量。试验结果(表 2~5)看出,在封闭系统中土壤液相部分的铵离子分布量与气相部分的氨分子的分布量比例能表明长效碳铵的稳定性。从表 2 可看出,在室温条件下放置 90 d 的过程中,长效碳铵进入气相中的氨分子含量为 24.5%~43.8%,平均为 34.7%,尚有 65% 的铵态氮存在于土壤溶液和

表 2 在封闭系统中土壤饱和持水条件的氮挥发损失率

处理	氨态氮(NH ₃)挥发损失率/%					减少挥发率 (百分点)
	1 ^{a)}	2 ^{a)}	3 ^{a)}	4 ^{a)}	平均	
长效碳铵	24.5	43.8	41.4	29.2	34.7	31.6
普通碳铵	60.6	58.4	73.0	73.1	66.3	—

a) 系指室温条件下; 4 次重复 130 d 后测定结果

固相中. 而普通碳铵在同样条件进入气相中的氨分子为 58.4% ~ 73.1%, 平均为 66.3%, 前者较后者减少挥发量为 31.6 个百分点. 在上述相同试验条件下, 测定土壤的液相和固相中铵离子的贮存量, 从 10 至 130 d 共测 5 次, 铵态氮(NH_4^+)的贮量随时间延续而减少, 但长效碳铵中铵态氮的含量一直高于普通碳铵增加数值 23.1% ~ 88.6%, 平均增加贮存率 64.6%(表 3).

表 4 的试验是在室外开放系统中进行的, 由于夏季温度高导致铵态氮挥发损失较快, 处理后的第 7 天长效碳铵与普通碳铵两者的土壤铵态氮贮存量相近, 而延至 22 d, 前者含量 272.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后者则降至 23.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者较后者增加贮存率 1 055%; 时间延长到 35 d, 前者较后者增加贮存率 253%; 而 50 d 以后土壤铵态氮基本全部分解挥发.

在与上述试验相同的条件下, 测定了不同时间土壤硝态氮的形成量. 结果表明(表 5), 施长效碳铵处理硝态氮形成的高峰期为 65 d, 而普通碳铵则为 35 d, 前者较后者延缓硝态氮形成时间为 30 d. 硝态氮形成高峰期的绝对数值两者差异较大, 前者为 157.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后者者为 475.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者较后者减少 201.2%. 而时间延长到 65 d 时, 两者硝态氮形成量相近. 试验结果说明长效碳铵可以延缓硝态氮形成时间, 对减少氮的淋溶损失有缓解作用.

表 3 在封闭系统中土壤饱和持水条件下铵态氮的贮存量^{a)}

处理	测定时间/d					平均增加贮存率/%
	10	40	70	100	130	
长效碳铵	2 196	1 214	924	919	728	
普通碳铵	1 784	689	490	509	475	
增加贮存率/%	23.1	76.2	88.6	80.6	54.5	64.6

a) 铵态氮(NH_4^+)单位/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

表 4 在开放系统中土壤田间持水条件下铵态氮贮存量^{a)}

处理	测定时间/d				
	7	22	35	50	80
空白	8.1	7.9	10.4	10.0	6.5
长效碳铵	743.2	272.4	40.6	11.3	9.9
普通碳铵	727.2	23.6	11.5	12.4	8.9
增加贮存率/%	2.2	1 045	253	-8.9	11.2

a) 铵态氮(NH_4^+)单位/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

表 5 在开放系统中土壤田间持水条件下土壤硝态氮形成量^{a)}

处理	测定时间/d				
	7	22	35	50	65
长效碳铵	10.9	29.1	47.0	38.9	157.9
普通碳铵	15.3	101.2	475.6	162.8	156.8
增减数值	4.4	72.1	428.6	123.9	-1.1
减少率/%	40	248	912	319	-1

a) 硝态氮(NO_3^-)单位/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

3.4 长效碳铵氮素利用率试验

减少碳铵的氨挥发, 提高氮素利用率, 促进作物增产, 是长效碳铵研究的主要目的. 用水稻进行盆栽试验结果(表 6, 7)表明, 施用长效碳铵处理的水稻产量性状均比施用普通碳铵明显提高, 前者较后者每盆秸秆重增加 4.4%, 根量增加 12.1%, 穗粒数增加 9.5%, 穗长增加

5.6%，籽粒重增加 11.2%。对两处理平均数差异显著性检验结果， $t=4.073$ ($t_{0.05}=2.776$, $t_{0.01}=4.604$)，达到显著水平。

表 6 施用不同碳铵对水稻产量性状的影响(5 盆平均)

处理	每盆穗数/ 个	穗长/cm	每穗粒数/ 粒	粒重/g·盆 ⁻¹	秸秆重/g·盆 ⁻¹	根量/g·盆 ⁻¹
长效碳铵	84.2	17.1	86.5	123.3	97.7	23.2
普通碳铵	82.4	16.2	79.0	110.9	93.6	20.7
增产率/%	2.2	5.6	9.5	11.2	4.4	12.1

表 7 施用不同碳铵处理的水稻籽粒产量^{a)}

处理	I	II	III	IV	V	平均
长效碳铵	120.8	120.2	138.7	122.8	114.1	123.3
普通碳铵	110.9	106.2	124.9	101.4	111.3	110.9
增产率/%	8.9	13.2	11.1	21.1	2.5	11.2

a) 单位：g/ 盆(干重)

玉米小区试验结果(表 8～10)表明，每 666.6 m² (亩)¹⁾施普通碳铵 40 kg，增产玉米 65.5 kg，每 kg 氮增产 9.6 kg；施普通碳铵 50 kg，则增产玉米 74.4 kg，每 kg 氮增产 8.8 kg。施长效碳铵 40 kg，增产玉米 83.7 kg，每 kg 氮增产 12.3 kg；施长效碳铵 50 kg，则增产 100.8 kg，每 kg 氮增产玉米 12.6 kg。两者比较，前者每 kg 氮平均增产粮食 9.2 kg，后者每 kg 氮平均增产粮食 12.45 kg，后者较前者增产率为 35.3%。收获后对玉米的吸氮量和氮素利用率进行了测定(表 10)，结果表明，在施用等氮量条件下，长效碳铵比普通碳铵玉米吸氮量多，提高氮素利用率 5.9%～10.2%，有利于玉米增产。

表 8 玉米小区不同碳铵处理的产量结果^{a)}

区组	普通碳铵 40 kg/666.6 m ²	普通碳铵 50 kg/666.6 m ²	长效碳铵 40 kg/666.6 m ²	长效碳铵 50 kg/666.6 m ²	C _K	T _r
I	392.9	406.4	408.9	416.7	357.6	1 982.5
II	382.4	385.0	408.9	457.9	317.5	1 951.7
III	379.7	390.2	391.7	404.2	283.6	1 849.4
T _r	1 155.0	1 181.6	1 209.5	1 278.8	958.7	
X	385.0	393.9	403.2	426.3	319.6	T=5 783.5

a) 产量单位为 kg/666.6 m²

表 9 玉米各小区不同碳铵处理产量比较表^{a)}

处理	产量	与 CK 比	与普通碳铵 40 比	与普通碳铵 50 比	与长效碳铵 40 比
CK	319.6				
普通碳铵 40	385.0	65.5			
普通碳铵 50	393.9	74.4	8.9		
长效碳铵 40	403.2	83.7	18.2	9.3	
长效碳铵 50	426.3	106.8	41.3	32.4	23.1

a) 单位均为 kg/666.6 m²

1) 每亩法定计量单位为 666.6 m²，文中施肥、增产单位均指亩

表 10 不同碳铵处理玉米吸氮量及氮素利用率

处理/kg · (666.6 m ²) ⁻¹	玉米亩吸氮量/kg	氮素利用率/%
CK	5.189	
普通碳铵 40	6.976	26.3
普通碳铵 50	6.844	19.5
长效碳铵 40	7.380	32.2
长效碳铵 50	7.710	29.7

3.5 长效碳铵延长肥效期试验

由于长效碳铵的肥效期延长,作基肥 1 次施入,在作物生长期可以不再追肥,这是该肥料的主要优点,可由田间试验(表 11 ~ 13)结果证明. 试验共设 3 个处理,长效碳铵 1 次基施 75 kg/666.6 m², 中间不再追肥, 666.6 m² 产达 414.5 kg; 比普通碳铵基施 50 kg, 追施 25 kg, 产 344.9 kg 处理比较, 增产率为 20.18%; 与普通碳铵基施 25 kg/666.6 m², 前期追施 25 kg, 后期追施 25 kg, 产 347.5 kg 处理比较, 增产率为 19.28%. 方差分析结果, 处理间差异达到显著水平. 从新复极差检测结果看出(表 13), 普通碳铵 1 次追肥与 2 次追肥两处理之间差异不显著, 而长效碳铵 1 次基施与普通碳铵分期追施比较的差异显著. 从而肯定了长效碳铵采用 1 次性基施, 在作物生长期间不再追肥, 可以满足氮肥的需要而达到增产效果, 进一步证实长效碳铵肥效期可延至 90 ~ 110 d, 基本能满足玉米等作物全生长期对氮肥的需求.

表 11 长效碳铵与普通碳铵不同施肥方法的增产效果^{a)}

处理	I	II	III	总平均	与追 1 次肥比较/%	与追 2 次肥比较/%
长效碳铵 1 次基肥 (75 kg/666.6 m ²)	427.0	419.5	397.0	414.5	20.18	19.28
普通碳铵一基一追 (50 kg 基 25 kg 追/666.6 m ²)	375.1	339.0	353.2	344.9	0	—
普通碳铵一基二追 (25 kg 基 50 kg 2 次追/666.6 m ²)	341.0	347.0	354.2	347.5	—	0

a) 增产量为 kg/666.6 m²

表 12 对表 11 数据进行方差分析的结果

变异来源	总平方和	自由度	均方	F	F _{0.05}	F _{0.01}
处理间	8 006.94	2	4 003.47	17.5	6.94	18.00
区组间	321.22	2	160.61	0.7		
误差	914.95	4	228.74			
总变异	9 243.11	8				

表 13 新复极差检测结果

处理/kg · (666.6 m ²) ⁻¹	666.6 m ² 产/kg	差异显著性比较	
		0.05	0.01
长效碳铵基施 75	414.5	a	A
普通碳铵基施 50+追施 25	344.9	b	A
普通碳铵基施 25+两次追施 25	347.5	b	A

4 结束语

(1) 长效碳铵是普通碳铵与有机化合物 DCD 形成的共结晶的新型氮肥, DCD 以六角菱形体被包裹在普通碳铵中。长效碳铵晶体大多为棒状和方形体, 其大小为 $\varnothing 0.25 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$, $\varnothing 0.46 \text{ mm} \times 0.57 \text{ mm} \times 0.50 \text{ mm}$, 长效碳铵共结晶过程属于物理过程。

(2) 长效碳铵有较好的稳定性和耐贮性, 在不同温度下的试验结果, 长效碳铵比普通碳铵减少挥发损失率 47%。由于长效碳铵减少了挥发量, 增加了铵离子稳定性, 从而改善了碳酸氢铵的基本理化性状。

(3) 长效碳铵增加了铵在土壤中的稳定性, 可以减少土壤中氨态氮挥发率 31.6 个百分点, 增加土壤中铵态氮的贮存率 64.6%, 在土壤中的贮存时间较普通碳铵约延长 1 倍; 在土壤中硝态氮的形成时间比普通碳铵延后 30 d 左右。

(4) 长效碳铵能提高氮素利用率, 促进作物增产。普通碳铵每 kg 氮平均增产粮食 9.2 kg, 而长效碳铵每 kg 氮平均增产粮食 12.5 kg, 后者较前者每 kg 氮多增产粮食 3.25 kg, 增加率为 35.3%; 在施用等氮量条件下, 长效碳铵比普通碳铵玉米吸氮量增多, 氮素利用率提高 5.9 ~ 10.2 个百分点。

(5) 长效碳铵作基肥 1 次施入, 作物生长期不再追肥, 基本能满足作物生长前、后期的氮素供应, 比普通碳铵多次追肥有增产效果, 证明长效碳铵的肥效期可以延长至 90 ~ 110 d。作为免中耕耕作法、覆膜农业和节水农业技术推广的肥料具有良好的应用前景。

致谢 在本文的试验中, 沈阳农业大学张继宏教授和北京农业科学院土肥研究所张有山研究员作了大量工作, 在此表示衷心的感谢。参加本项工作的还有中国科学院沈阳应用生态研究所沈善敏、左敬兰、崔桂霞和李欣等同志。

参 考 文 献

- 1 张志明. 中华人民共和国长效碳酸氢铵及其制备方法. 发明专利证书, ZL 90 105012.1, 1994, 7: 19
- 2 门格尔 K. 植物营养与施肥原理. 农业部教育司, 西北农业大学, 1983.
- 3 Cascho G T, Suyder G H. Sulfur-coated fertilizer for Sugarcane: I. Plant response to sulfurcoated Urea. *Soil Sci Soc Amer J*, 1976, 40: 119 ~ 122
- 4 Frye W W, Fall V S. Spring- applied sulfurcoated urea, and sodium nitrate for corn. *Agronomy Journa*, 1977, 69 (5 ~ 6): 278 ~ 282
- 5 Baligar V C, Dancan R R, Fageria N K. Soil-plant Interaction on Nutrient Use Efficiency in Plant: An Overview. *Crops as Enhancers of Nutrients Use*. New York: Academic Press, 1990. 351 ~ 360
- 6 曹志洪. 长效碳酸氢铵的研究. *土壤学报*, 1980, 17(2): 131 ~ 144
- 7 孙秀廷. 长效碳铵的制造工艺、释放特性及其肥效研究. *山东化工*, 1980, (2): 27 ~ 31
- 8 李良模. 我国土壤硝化作用研究概况与展望. 我国土壤氮素研究工作的现状与展望. 北京: 科学出版社, 1980. 68 ~ 81
- 9 刘芷宇. 土壤 - 根系微区养分环境的研究概况. *土壤学进展*, 1980, 8(3): 1 ~ 11
- 10 孙 羲. 土壤养分、植物营养与合理施肥. 北京: 农业出版社, 1983
- 11 何念祖, 孟锡福. 植物营养原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1983
- 12 李庆逵. 长效肥简介. *土壤农化参考资料*, 1976, (2): 1 ~ 19
- 13 江苏省盐城地区长效肥协作组. 长效碳铵在水稻上的应用试验初报. *土壤*, 1975, 4: 178 ~ 182
- 14 张志明, 吴松荫. 中国土壤酶学研究文集. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1988