



稳定性液体氮肥在保护性耕作黑土中施用效果

王高旭¹, 田耕², 周佳丰¹, 张晓岩¹, 冯国忠¹, 高强^{1*}, 张忠庆^{1*}

(1. 吉林农业大学资源与环境学院 / 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室 / 秸秆综合利用与黑土地保护教育部重点实验室, 吉林 长春 130118; 2. 吉林省沃亿佳生态农业有限公司, 吉林 双辽 136400)

摘要: 氮肥利用率低是制约我国东北黑土区玉米产业高效稳定发展的重要因素, 以尿素硝铵溶液 (UAN) 为原料, 硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶微胶囊 (CPCS) 为材料, 制备稳定性液体氮肥, 研究其对黑土区玉米氮素吸收与利用和生长发育的影响。以 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶传统乳油剂型 (CPEC) 为对照, 制备了 0.5%CPCS-UAN、1%CPCS-UAN、2%CPCS-UAN 3 种稳定性液体氮肥。田间试验设置 6 个处理: 不施氮肥 (N0)、UAN (N180)、1%CPEC-UAN (N180)、0.5%CPCS-UAN (N180)、1%CPCS-UAN (N180) 和 2%CPCS-UAN (N180)。在春玉米生育期内测定土壤无机氮动态变化及植株氮素吸收量, 并在成熟期测定产量及其构成因素。2020 和 2021 年田间试验结果显示, 与 UAN 处理相比, CPCS-UAN 处理能显著提高玉米产量和植株吸氮量, 其中 1%CPCS-UAN 处理表现最优, 玉米产量增加 6.38% ~ 8.35%, 吸氮量增加 24.12 ~ 31.70 kg/hm²; 与传统乳油剂型 1%CPEC-UAN 处理相比, 1%CPCS-UAN 处理玉米产量增加 5.39% ~ 6.30%, 吸氮量增加 17.51 ~ 18.98 kg/hm², CPCS-UAN 处理增产的主要原因是单穗粒数和百粒重的增加。在玉米整个生育期 CPCS-UAN 处理 0 ~ 20 cm 土层土壤的铵态氮和硝态氮整体呈现逐渐降低的趋势, 其土壤铵态氮含量在各个生育时期均高于其他处理。CPCS-UAN 处理能显著降低氮肥表观损失率, 增加氮肥表观利用率, 其中 1%CPCS-UAN 处理的土壤氮肥表观损失率最低, 为 33.2% ~ 34.0%, 氮素表观利用率最高, 为 40.9% ~ 49.6%。在黑土中, CPCS 配合 UAN 制成的稳定性液体氮肥可以有效抑制玉米生育期内铵态氮向硝态氮转化, 减少氮素损失, 增加植株吸氮量, 提高氮肥利用率和玉米产量。

关键词: 玉米; 尿素硝铵溶液; 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶微胶囊; 黑土; 稳定性液体氮肥

氮是植物正常生长发育所必需的营养元素, 也是限制作物产量最重要的营养元素, 因此农业生产中施用氮肥是作物获得高产的主要措施之一^[1-2]。我国氮肥施用量大, 粮食单产随氮肥投入量的增加明显提高^[3], 氮肥利用率却显著下降^[4], 平均约为 35%^[5], 损失率较高^[6]。氮肥施用后, 通过淋溶、径流、氨挥发、硝化-反硝化等途径损失的氮素约有 40% ~ 50%, 是导致氮肥利用率低的主要原因之一^[7-8], 一方面造成肥料资源的浪费, 另一方面还严重污染环境^[9-10]。因此, 提高氮肥利用率、减少氮素损失、开发高效环保类的新型氮肥, 对于满足

现代农业科学发展具有十分重要的现实意义^[11]。

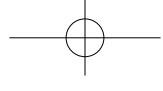
尿素硝铵溶液 (UAN, 也称氮溶液) 是目前世界各国使用最多的液体氮肥^[12], 是集硝态氮、铵态氮和酰胺态氮 3 种氮源于一身的液体氮肥品种^[13]。相比传统尿素, UAN 可提高农作物的产量和品质^[14], 由于 UAN 主要成分是尿素和硝酸铵, 施用后氮损失严重^[15]。研究发现其配施氮肥增效剂在小麦、玉米、马铃薯等作物上都表现出良好的应用效果^[16-20]。徐丽萍等^[16]研究发现 UAN 配施脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺 (NBPT) 增加了玉米根的干重和氮素累积量, 其损失率降低了 5.55% ~ 8.82%。杨俊刚等^[17]研究发现, 在 UAN 中添加 NBPT 或双氰胺 (DCD) 对生菜产量、品质均有显著影响, 生菜产量比 UAN 处理增加 10% ~ 21%。程学刚等^[18]报道, UAN 中添加腐殖酸和黄腐酸 2 种增效剂后, 明显促进了菜花的生长发育, 提高幼苗株高、茎粗、干鲜重等指标, 氮肥

收稿日期: 2022-03-30; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 吉林省教育厅科学技术项目 (JJKH20210353KJ)。

作者简介: 王高旭 (1994-), 硕士研究生, 主要从事新型肥料研制与应用。E-mail: wanggaoxu0222@163.com。

通讯作者: 高强, E-mail: gyt199962@163.com。张忠庆, E-mail: 447000257@qq.com



利用率也有大幅度提升。Nikolajsen 等^[19]研究发现, UAN 配施 NBPT, 可以提高小麦产量, 减少 NH_3 排放。邵宇辉^[20]报道, 滴灌施肥条件下, 含 NBPT 的 UAN 处理分别比尿素和 UAN 处理的产量提高 9.8% 和 9.1%, 氮肥利用率提高 41.9% 和 16.7%。2-氯-6(三氯甲基)吡啶是具有显著硝化抑制作用的氮肥增效剂, 在几十年前被开发出来^[21], 并已广泛应用于农业生产中^[22-23]。目前对 2-氯-6(三氯甲基)吡啶的研究主要集中在传统乳油剂型配施尿素对土壤氮循环的参与及其对作物产量的影响上^[24-26], 对 2-氯-6(三氯甲基)吡啶微胶囊新剂型(CPCS)的研究相对较少, 微胶囊剂型能够维持硝基吡啶缓慢释放 80 ~ 120 d, 最大限度的发挥硝化抑制剂的作用^[27], 目前将其与 UAN 制备成稳定性氮肥来使用尚未见文献报道。

针对 2-氯-6(三氯甲基)吡啶使用方法比较繁琐、氮素利用率提高较少、作用时间较短、有效性较差等问题^[28-30], 本研究将硝化抑制剂 2-氯-6(三氯甲基)吡啶微胶囊化, 增加其稳定性, 利用相关保护剂, 制备出稳定性液体氮肥, 并连续两年在吉林省黑土区设置大田试验, 以 UAN、2-氯-6(三氯甲基)吡啶传统乳油剂型(CPEC)为对照, 研究稳定性液体氮肥对春玉米产量与生物学指标、氮素积累吸收量及土壤无机氮动态变化的影响, 探讨其对保护性耕作黑土氮素转化及玉米生长发育的影响, 评估其应用效果与氮素利用效率, 以期新型肥料研发和氮素高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 稳定性液体氮肥制备

1.1.1 试验材料与仪器

供试肥料: UAN 为中化化肥控股有限公司生产, 氮含量 32.0%, 其中硝态氮、铵态氮和酰胺态氮的比例分别为 7.7%、7.7% 和 16.6%。

供试生化抑制剂: 硝化抑制剂 2-氯-6(三氯甲基)吡啶微胶囊新剂型(CPCS), 有效成分含量为 10%^[31]。硝化抑制剂 2-氯-6(三氯甲基)吡啶乳油(CPEC), 有效成分含量为 30%, 均由实验室内制备。

试验仪器: 集热式恒温加热磁力搅拌器(上海力辰邦西仪器科技有限公司生产, 型号 DF-101S)、数显恒温水浴锅(常州朗越仪器制造有限公

司生产, 型号 SYG-1)、高剪切分散乳化机(上海弗鲁克科技发展有限公司, 型号 FA25)。

1.1.2 稳定性液体氮肥制备流程

CPCS-UAN 制备: 称取一定量的 CPCS, 加入 1% 保护剂, 270 r/min 搅拌 1 h, 再向其加入 0.5% 稳定剂, 270 r/min 搅拌 1 h, 保持材料温度为 35 ~ 40℃, 使其充分结合。静止后常温下分别将上述溶液加入到定量的 UAN 中[其中 2-氯-6(三氯甲基)吡啶含量分别为纯氮量的 0.5%、1% 和 2%], 270 r/min 搅拌 1 h, 分别得到稳定性液体氮肥 0.5%CPCS-UAN、1%CPCS-UAN 和 2%CPCS-UAN。

CPEC-UAN 制备: 称取一定量的 CPEC, 加入到定量的 UAN 里[其中 2-氯-6(三氯甲基)吡啶含量为纯氮量的 1%], 270 r/min 搅拌 1 h, 得到稳定性液体氮肥 1%CPEC-UAN。

1.2 田间试验

1.2.1 试验区概况

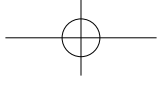
试验在吉林省四平市梨树县梨树镇泉眼沟村中国农业大学梨树实验站进行, 土壤类型为黑土, 肥力较高, 该地块已经连续两年采用秸秆覆盖方式进行保护性耕作, 试验田 0 ~ 20 cm 耕层土壤 pH 为 6.89, 有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 20.89 g/kg、84.02 mg/kg、23.46 mg/kg 和 208 mg/kg。

研究区域属温带半湿润大陆性季风气候, 雨热同期, 年均降水量在 580 mm 左右, 集中在 6—8 月, 主要种植制度一年一熟玉米连作。其中两年的天气分别表现为 2020 年春季气温波动大, 降水量较少, 但极端降水频发, 玉米生育期内降水量为 558 mm; 2021 年全年气温较稳定, 降水量较大, 玉米生育期内降水量为 581 mm。

1.2.2 试验设计

试验共设 6 个处理: 1) 不施氮肥(N_0); 2) 尿素硝铵溶液(UAN); 3) 含 1%CPEC 稳定性液体氮肥(1%CPEC-UAN); 4) 含 0.5%CPCS 稳定性液体氮肥(0.5%CPCS-UAN); 5) 含 1%CPCS 稳定性液体氮肥(1%CPCS-UAN); 6) 含 2%CPCS 稳定性液体氮肥(2%CPCS-UAN)。

试验小区面积为 48 m², 每个处理重复 3 次, 小区随机区组设计, 供试作物为春玉米(品种: 良玉 99), 种植密度为 6.5×10^4 株/hm²。肥料施用量为 N 180 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²。磷肥和钾肥分别为重过磷酸钙(P₂O₅ 45%)和氯化



钾 (K_2O 60%)。

分别于2020年5月10日和2021年5月11日施基肥并播种,两年均在10月7日收获。施肥沟与苗带的横向距离为8 cm,施肥深度为12 cm。施肥时先将液体肥料定量均速撒入施肥沟,其余肥料均匀混合后撒入施肥沟覆土。所有肥料均为一次性基施,除供试肥料和施肥方法外其他田间管理均与当地农民习惯保持一致,生育期内均未进行人工灌溉。

1.3 测定项目及方法

田间试验施基肥前取0~20 cm耕层土壤,按常规法测定土壤基本理化性质^[32]。分别在玉米施肥前、苗期、拔节期、吐丝期、灌浆期、乳熟期、收获后采用土钻以20 cm为一层分别取0~100 cm土层的新鲜土壤。播种前整个田块选择20个位点,主要生育时期每个小区选择2个位点,收获后每小区选择5个位点,每个土层的多样点土壤样品充分混合后放入冰盒,迅速带回实验室。新鲜土样过3.30 mm筛后,采用1 mol/L KCl溶液进行振荡浸提,流动分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮含量^[33]。

试验田收获时测定每小区的植株密度,选择10株代表性植株调查产量性状指标,包括:穗长、穗粗、秃尖长、单穗粒数和百粒重。每小区单收单打测得产量,并取3株代表性植株带回实验室,按器官分离,在105℃杀青40 min后,75℃烘至恒重,磨碎过筛后采用 $H_2O_2-H_2SO_4$ 消煮,凯氏定氮仪测定玉米氮素吸收量。

1.4 计算公式及数据统计分析

参考巨晓棠等^[6, 34]的方法计算以下参数:

生育期土壤氮素净矿化量 = 不施氮区作物吸氮量 + 不施氮区土壤无机氮残留量 - 不施氮区土壤试验初始无机氮量;

生育期土壤氮素表观损失量 = (生育期施氮量 + 土壤试验初始无机氮量 + 生育期土壤氮素净矿化量) - (作物携出量 + 收获后土壤无机氮残留量);

氮素盈余量 = 氮素表观损失量 + 收获后土壤无机氮残留量;

氮肥表观残留率 (%) = (施氮区残留氮量 - 不施氮肥区残留氮量) / 施氮量 × 100;

氮肥表观利用率 (%) = (施氮区作物吸氮量 - 不施氮区作物吸氮量) / 施氮量 × 100;

氮肥表观损失率 (%) = 100 - 氮肥表观利用率 - 氮肥表观残留率。

采用Excel 2019处理数据和绘制图表,采用SPSS 22.0进行统计分析,采用LSD法进行差异显著性检验(0.05水平)。

2 结果与分析

2.1 稳定性液体氮肥对玉米产量及其性状的影响

如表1所示,含氮肥增效剂的处理,籽粒产量均高于UAN处理。2020年,CPCS-UAN处理中,1%CPCS-UAN处理产量最高(11023.59 kg/hm²),显著高于0.5%CPCS-UAN(10600.46 kg/hm²)和2%CPCS-UAN(10411.26 kg/hm²)处理。2021年,CPCS-UAN处理中,1%CPCS-UAN(12748.98 kg/hm²)和2%CPCS-UAN(12635.61 kg/hm²)处理获得最高产量,与0.5%CPCS-UAN(12449.61 kg/hm²)处理差异不显著。分析发现,与传统乳油剂型相比,0.5%CPCS-UAN与1%CPEC-UAN处理差异不显著。1%CPCS-UAN和1%CPEC-UAN处理差异显著,两年间1%CPCS-UAN较1%CPEC-UAN处理增产5.4%~6.3%。

施氮后的玉米产量性状要优于N0处理(表1)。施氮处理间主要在单穗粒数和百粒重上存在差异。CPCS-UAN处理中,1%CPCS-UAN处理的单穗粒数、百粒重显著高于0.5%CPCS-UAN和2%CPCS-UAN处理,且与1%CPEC-UAN处理在百粒重上存在显著差异,在单穗粒数上差异不显著。

2.2 稳定性液体氮肥对玉米植株吸氮量的影响

施氮可显著提高玉米植株的氮素吸收量(图1)。2020—2021年,对比UAN处理,添加氮肥增效剂处理均可增加植株吸氮量。CPCS-UAN处理中,均以1%CPCS-UAN处理的植株吸氮量最高(213.20和231.68 kg/hm²),而0.5%CPCS-UAN处理最低(189.01和199.97 kg/hm²)。与传统乳油剂型相比,0.5%CPCS-UAN与1%CPEC-UAN处理相比差异不显著,1%CPCS-UAN和1%CPEC-UAN处理差异显著,两年间1%CPCS-UAN较1%CPEC-UAN处理植株吸氮量增加17.51~18.98 kg/hm²。

2.3 稳定性液体氮肥对土壤无机氮动态变化的影响

研究结果表明(图2),在玉米苗期,各处理0~20 cm土层中铵态氮含量达到高峰,拔节期之后显著下降,直至成熟期一直保持较低的水平。苗期至拔节期,CPCS-UAN处理土壤中铵态氮含量缓慢下降,拔节期仍保持着较高的铵态氮含量,

表 1 2020 和 2021 年不同处理玉米产量及其构成因素与增产率

年份	处理	单穗粒数 (个)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	增产率 (%)		
					对比 N0	对比 UAN	对比 1% CPEC-UAN
2020	N0	430.73 ± 5.72d	26.15 ± 0.67c	7017.33 ± 48.51d			
	UAN	538.73 ± 12.43c	31.80 ± 0.46b	10174.03 ± 158.43c	44.98 ± 1.28		
	1%CPEC-UAN	561.03 ± 10.86ab	32.33 ± 0.05b	10369.72 ± 80.22bc	47.77 ± 0.42	1.92 ± 1.36	
	0.5%CPCS-UAN	558.15 ± 7.35ab	32.28 ± 0.41b	10600.46 ± 321.98b	51.06 ± 8.37	4.19 ± 2.86	2.22 ± 2.73
	1%CPCS-UAN	577.49 ± 10.90a	33.86 ± 0.31a	11023.59 ± 102.14a	57.09 ± 1.18	8.35 ± 1.72	6.30 ± 0.36
	2%CPCS-UAN	553.52 ± 4.46bc	32.30 ± 0.71b	10411.26 ± 256.02bc	48.37 ± 3.94	2.33 ± 3.40	0.40 ± 2.84
2021	N0	457.52 ± 4.72d	21.60 ± 0.51d	7563.43 ± 70.41c			
	UAN	497.40 ± 6.11c	27.90 ± 0.06c	11984.82 ± 68.93b	58.47 ± 1.54		
	1%CPEC-UAN	577.04 ± 14.12ab	29.47 ± 0.39b	12096.73 ± 345.40b	59.95 ± 5.95	0.93 ± 2.87	
	0.5%CPCS-UAN	553.55 ± 7.64b	28.04 ± 0.29c	12449.61 ± 405.00ab	64.61 ± 5.18	3.88 ± 2.78	2.92 ± 4.21
	1%CPCS-UAN	587.25 ± 3.79a	30.22 ± 0.20a	12748.98 ± 205.18a	68.57 ± 3.44	6.38 ± 1.20	5.39 ± 2.47
	2%CPCS-UAN	583.67 ± 20.20a	29.48 ± 0.47b	12635.61 ± 276.32a	67.07 ± 2.31	5.43 ± 2.49	4.45 ± 5.36
方差分析							
试验年份 (Y)		ns	***	***			
施肥处理 (N)		***	***	***			
Y × N		***	***	***			

注：每年同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)；“ns”表示无明显差异 ($P>0.05$)，“***”表示差异极显著 ($P<0.001$)。

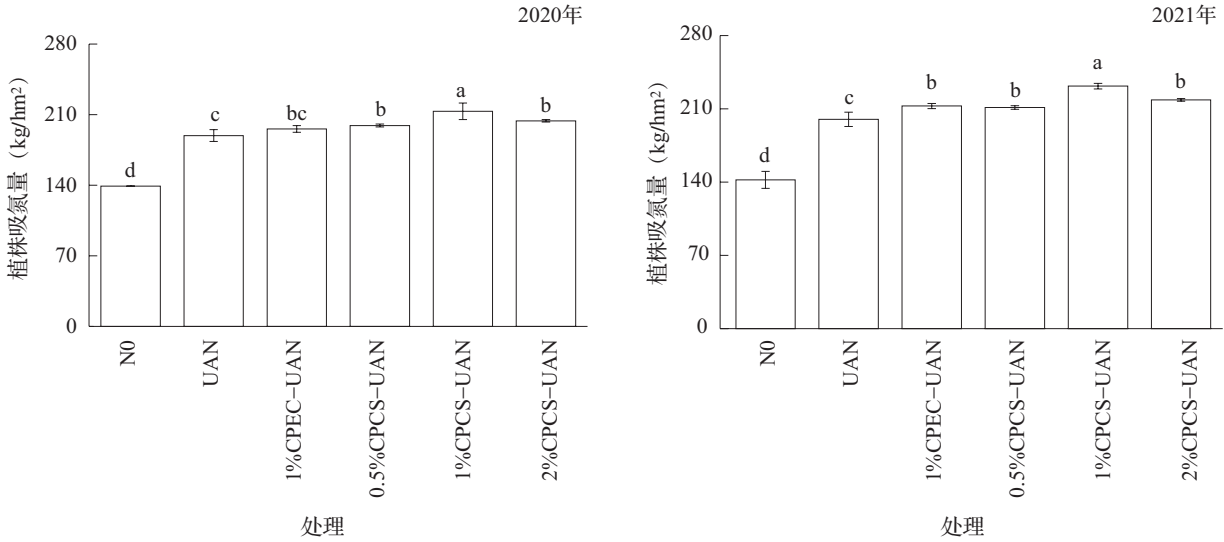


图 1 不同处理玉米植株氮素吸收量

表明 CPCS-UAN 处理中的硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶微胶囊的缓释作用使氮素缓慢释放,从而抑制了玉米生长前期土壤中铵态氮转为硝态氮。在玉米拔节期至成熟期, CPCS-UAN 处理土壤铵态氮含量一直保持着较高的水平。说明由于氮肥增效剂 CPCS 的添加,抑制了硝化作用速率,使生育后期土壤中保持相对较高的铵态氮含量,为玉米各生育时期氮素的持续供应提供了保障。

如图 2 所示, 2021 年玉米各生育期不同处理 0 ~ 20 cm 土层中硝态氮含量呈下降趋势。说明氮肥增效剂 CPCS 能够对土壤中铵态氮的硝化起到显著抑制作用。玉米吐丝期直至成熟期, 各施肥处理土壤中硝态氮均维持在较低水平, 但 CPCS-UAN 处理硝态氮仍保持着较高的水平, 说明施用 CPCS-UAN 能够延长氮肥的肥效, 更有利于作物在生育中后期获得充足的氮素供应, 从而促进作物产量和氮肥利用率的提高。

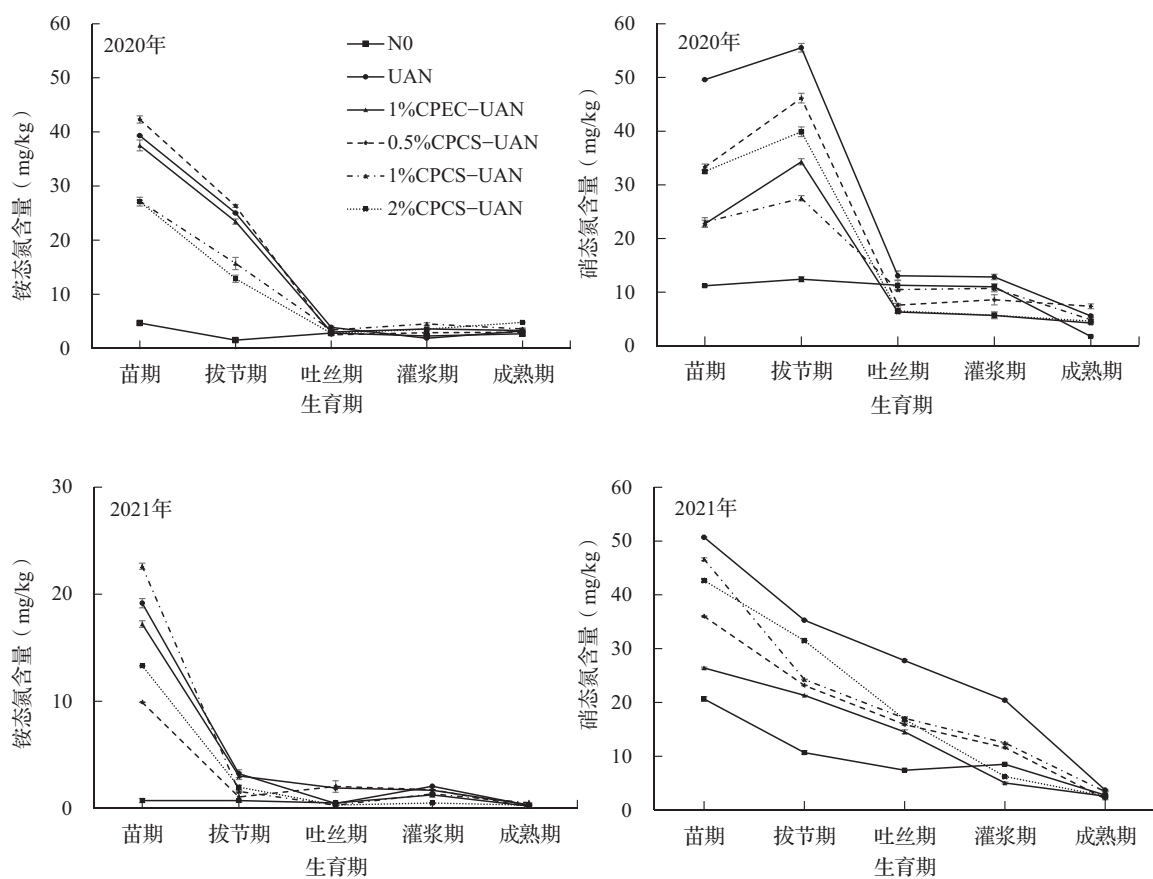


图 2 玉米各生育期 0 ~ 20 cm 土层土壤铵态氮和硝态氮的动态变化

2.4 稳定性液体氮肥对土壤-作物系统氮素平衡的影响

分析农田土壤-作物系统的氮素平衡发现(表 2), 两年中氮肥投入均是施氮处理氮素输入的主要来源, 2020 年占比 49.1%, 2021 年占比 50.8% ~ 51.6%, 其次为播前土壤无机氮累积量, 而氮素矿化量较低。氮素输出的主要途径为作物吸收, 2020 年占比 51.4% ~ 74.7%, 2021 年占比 57.3% ~ 81.0%, 其次为土壤无机氮残留, 而氮素表观损失则较低。施氮处理中, UAN 处理的氮素盈余最高。CPCS-UAN 处理中, 1%CPCS-UAN 处理氮素盈余最低。其次是

2%CPCS-UAN 处理, 0.5%CPCS-UAN 处理最高。与传统乳油剂型相比, 2%CPCS-UAN 与 1%CPCS-UAN 处理氮素盈余量均显著高于 1%CPEC-UAN 处理, 而 0.5%CPCS-UAN 处理与 1%CPEC-UAN 处理相比差异不显著。相比 2020 年, 2021 年播前土壤无机氮累积量、氮素表观损失量相近, 氮素矿化量偏低, 作物吸氮量均偏高, 因而氮素盈余量也较低。与传统乳油剂型相比, 1%CPCS-UAN 处理的氮素盈余量、氮素表观损失量均显著低于 1%CPEC-UAN 处理, 说明 CPCS-UAN 有利于减少土壤-作物系统的氮素盈余, 从而降低氮素损失风险。

表 2 不同处理土壤 – 作物系统的氮素平衡状况 (kg/hm²)

年份	项目	N0	UAN	1%CPEC-UAN	0.5%CPCS-UAN	1%CPCS-UAN	2%CPCS-UAN
2020	氮输入	施氮量	0.0	180.0	180.0	180.0	180.0
		播前土壤无机氮累积量	107.8	107.8	107.8	107.8	107.8
		表观氮素矿化量	78.7	79.4	79.4	79.4	79.4
		总输入量	186.5	367.2	367.2	367.2	367.2
	氮输出	作物吸收	139.0	189.0	195.5	199.1	213.3
		土壤无机氮残留量	47.5	84.1	95.5	98.4	92.7
		氮素表观损失	0.0	94.0	76.1	69.6	61.1
		氮素盈余	47.5	178.2	171.6	168.0	153.8
2021	氮输入	施氮量	0.0	180.0	180.0	180.0	180.0
		播前土壤无机氮累积量	110.0	103.4	107.9	105.6	102.5
		表观氮素矿化量	65.4	65.4	65.4	65.4	65.4
		总输入量	175.4	348.8	353.3	351.0	347.9
	氮输出	作物吸收	142.1	200.0	212.7	211.2	231.7
		土壤无机氮残留量	33.3	61.3	56.7	62.2	64.2
		氮素表观损失	0.0	87.6	83.9	77.6	52.0
		氮素盈余	33.3	148.9	140.6	139.8	116.3

2.5 稳定性液体氮肥对氮肥表观利用、损失、残留的影响

相比 2020 年，2021 年氮肥表观利用率相对较高，表观残留率明显降低，表观损失率则相对接近（表 3）。两年中均以 1%CPCS-UAN 处理的氮肥表观利用率最高，UAN 处理的氮肥表观利用率最低。CPCS-UAN 处理中，1%CPCS-UAN 处理显著高于 2%CPCS-UAN 和 0.5%CPCS-UAN 处理，其中以 0.5%CPCS-UAN 处理最低。而 0.5%CPCS-UAN

与 1%CPEC-UAN 处理相比差异不显著。从氮素表观损失率来看，两年间以 UAN 处理最高，CPCS-UAN 处理中，1%CPCS-UAN 处理低于 2%CPCS-UAN 和 0.5%CPCS-UAN 处理。与传统乳油剂型相比，1%CPCS-UAN 处理的氮肥表观利用率显著高于 1%CPEC-UAN 处理，而氮素表观损失率显著低于 1%CPEC-UAN 处理。结果表明，1%CPCS-UAN 施用氮素残留和损失较少，因此氮素利用率较高。

表 3 不同处理氮素表观利用、残留和损失率 (%)

处理	氮素表观利用率		氮素表观残留率		氮素表观损失率	
	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年
UAN	27.5c	32.0c	20.3d	14.8ab	52.1a	53.2a
1%CPEC-UAN	31.2bc	38.9b	26.6b	12.8b	42.1b	48.3ab
0.5%CPCS-UAN	33.0b	38.8b	28.3a	16.4a	38.7bc	44.8b
1%CPCS-UAN	40.9a	49.6a	25.1c	17.2a	34.0c	33.2c
2%CPCS-UAN	35.6b	42.3b	28.1a	13.9ab	36.3c	43.8b

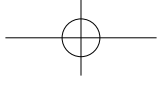
注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

3 讨论

3.1 稳定性液体氮肥对玉米产量及氮素吸收与利用的影响

UAN 本身具有多种氮素形态，有研究表明，

与尿素相比，施用 UAN 可促进玉米、小麦、水稻和棉花等作物增产并提高氮肥利用率^[35-38]，但由于 UAN 本身是液体肥料，活性较强，易发生各种损失，施入土壤后，导致短期内土壤中铵态氮含量升高，铵态氮在土壤微生物的作用下氧化成硝态



氮,而氧化产生的硝态氮易发生淋洗进入地下水,造成氮素损失和对环境的污染^[39-41]。前人研究表明^[16-20],UAN配施氮肥增效剂可提高氮素吸收,降低氮肥损失,促进作物增产,同时减少土壤硝态氮的残留,有利于协调作物产量、品质 and 环境保护的关系。这与本研究结果基本一致。施氮处理中,相比于含氮肥增效剂的施氮处理,两年间UAN产量最低,2020年平均下降1.9%~7.7%,2021年平均下降0.9%~6.0%。主要是在UAN中添加氮肥增效剂制成的稳定性液体氮肥延缓了氮素形态的转换速度和强度,降低了氮肥的供应强度,与作物吸收氮素的速度和强度更加匹配,提高了作物的吸收效率。硝化抑制剂2-氯-6-(三氯甲基)吡啶微胶囊剂型(CPCS),与CPEC相比,对氮肥释放的延缓具有更为明显的作用,使氮素供应更加平稳,比例更加合理,是实现作物增产和提高利用效率的可能原因。

3.2 含微胶囊新剂型稳定性液体氮肥对玉米产量及氮素吸收与利用的影响

本研究发现,CPCS-UAN处理中,1%CPCS-UAN处理产量最高,显著高于0.5%CPCS-UAN和2%CPCS-UAN处理,2020年分别增产4.0%、5.9%,2021年分别增产2.4%、0.9%。从产量构成因素方面来看,相比0.5%CPCS-UAN和2%CPCS-UAN处理,1%CPCS-UAN处理单穗粒数和百粒重显著提高,这可能是其增产的主要原因之一。理论上来说,氮肥增效剂含量越高,增产效果越大,本研究2%CPCS-UAN处理相比于低浓度处理增产效果不明显,这可能是因为作物主要吸收的氮素形态为硝态氮,氮肥增效剂CPCS的作用是抑制铵态氮转为硝态氮,增效剂含量越高,其抑制作用越明显,从而使土壤中长时间保持着较高的铵态氮含量,由此造成的氮损失过多,作物吸收的硝态氮少,故产量相对较低。从氮肥利用和损失来看,2020、2021年氮肥利用率1%CPCS-UAN处理显著高于0.5%CPCS-UAN和2%CPCS-UAN处理,氮肥表观损失率显著低于二者。这可能是由于在玉米生育期内,相比于0.5%CPCS-UAN和2%CPCS-UAN处理,1%CPCS-UAN处理对土壤铵态氮的硝化强度更为匹配,且在氮素矿化量、土壤无机氮残留量相近的情况下,氮素损失量较低、氮素盈余量较低,从而保持着较高的氮肥利用率。

3.3 不同剂型稳定性液体氮肥对玉米产量及氮素

吸收与利用的影响

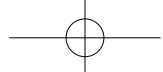
本研究表明,与传统乳油剂型1%CPEC-UAN处理相比,1%CPCS-UAN处理能显著提高玉米产量和植株吸氮量,两年间产量增加5.4%~6.3%,植株吸氮量增加17.51~18.98 kg/hm²。单穗粒数增多是其影响玉米产量的关键因素,这与姜亮^[42]的研究结果相同。将氮肥增效剂CPCS与UAN混合制备出的稳定性液体氮肥,延长了肥效时间,在玉米生育后期,能够更有效地提高土壤供氮能力,增加穗粒数与百粒重,从而提高玉米产量。1%CPCS-UAN处理2020、2021年氮肥利用率分别为40.9%、49.6%,而1%CPEC-UAN处理两年氮肥利用率分别为31.2%、39.0%,与低浓度0.5%CPCS-UAN处理差异不显著,说明CPCS-UAN较传统乳油剂型对土壤中的铵态氮转为硝态氮的抑制效果更好,减少了氮素损失和氮素盈余,增加植株吸氮量,达到了增产和提高了氮肥利用率的效果。

4 结论

与传统乳油剂型相比,CPCS-UAN可显著提高春玉米的产量、植株氮素吸收量,其中以中等浓度1%CPCS-UAN处理表现最好。CPCS-UAN在玉米整个生育期内均可保持较高的铵态氮含量,显著降低土壤硝态氮含量,保障了氮素的持续供应。与其余施氮处理相比,CPCS-UAN作物吸收和土壤无机氮残留持续上升,氮素表观损失和表观氮素盈余则持续下降。可见,CPCS-UAN有利于维持较稳定的土壤氮素水平,促进春玉米产量、植株氮素吸收增加,减少氮素损失,从而获得较高的氮肥利用率。综合作物产量、氮素吸收与利用和氮素平衡等指标,同时考虑肥料制备成本,以中等浓度1%CPCS-UAN效果最优。

参考文献:

- [1] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
- [2] 张卫峰,马林,黄高强,等.中国氮肥发展、贡献和挑战[J].中国农业科学,2013,46(15):3161-3171.
- [3] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H, et al. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts[J]. Advances in Agronomy, 2009, 102(9): 267-322.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental



- risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106 (9): 3041–3046.
- [5] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策 [J]. *土壤与环境*, 2000, 9 (1): 1–6.
- [6] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35 (12): 1493–1499.
- [7] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 778–783.
- [8] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (9): 3051–3058.
- [9] Lyu X, Wang T, Song X, et al. Reducing N_2O emissions with enhanced efficiency nitrogen fertilizers (EENFs) in a high-yielding spring maize system [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 273: 116422.
- [10] Feng X, Zhan X, Han X, et al. Slow-release nitrogen fertiliser suitable for one-time fertilisation of spring maize in Northeast China [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2021, 67 (3): 164–172.
- [11] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 新型高效肥料研究展望 [J]. *农业系统科学与综合研究*, 2012, 1 (1): 2–9.
- [12] 李凤云. UAN 溶液研究进展 [J]. *化工管理*, 2019, 33 (22): 54–55.
- [13] 马彦平. 尿素硝铵溶液: 氮肥行业新宠儿 [J]. *化工管理*, 2014, 28 (10): 28–30.
- [14] 王寅, 徐卓, 李博凝, 等. 尿素硝铵溶液对黑土区春玉米产量和氮素吸收利用的影响 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (4): 718–727.
- [15] 肖强, 李鸿雁, 衣文平, 等. 改性尿素硝铵溶液调控氮素挥发和淋溶的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28 (8): 1200–1209.
- [16] 徐丽萍. UAN 氮溶液配施脲酶抑制剂 NBPT 对土壤和玉米中氮的影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [17] 杨俊刚, 李艳梅, 孙焱鑫, 等. UAN 添加氮肥抑制剂对生菜产量、品质及土壤氮平衡的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (1): 67–74.
- [18] 程学刚, 洪丕征, 陈士更, 等. 腐植酸对尿素硝铵溶液增效作用研究 [J]. *腐植酸*, 2017 (2): 26–30.
- [19] Nikolajsen M T, Pacholski A S, Sommer S G, et al. Urea ammonium nitrate solution treated with inhibitor technology: effects on ammonia emission reduction, wheat yield, and inorganic N in soil [J]. *Agronomy*, 2020, 10 (2): 161.
- [20] 邵宇辉. 增效液体氮肥的研制及其在苏打盐碱土上的应用 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [21] Goring C A. Control of nitrification by 2-chloro-6 (trichloromethyl) pyridine [J]. *Soil Science*, 1962, 93 (3): 211–218.
- [22] Chen D L, Suter H C, Islam A, et al. Influence of nitrification inhibitors on nitrification and nitrous oxide (N_2O) emission from a clay loam soil fertilized with urea [J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, 42 (4): 660–664.
- [23] 黄益宗, 冯宗炜, 张福珠. 硝化抑制剂硝基吡啶在农业和环境保护中的应用 [J]. *土壤与环境*, 2001, 10 (4): 323–326.
- [24] Fisk L M, Maccarone L D, Barton L, et al. Nitrapyrin decreased nitrification of nitrogen released from soil organic matter but not amoA gene abundance at high soil temperature [J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, 88: 214–223.
- [25] Ren B Z, Zhang J W, Dong S T, et al. Nitrapyrin improves grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize waterlogged in the field [J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109 (1): 185–192.
- [26] Martinsa M R, Sant'Anna S A C, Zamanc M, et al. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: impact on N_2O and NH_3 emissions, fertilizer- ^{15}N recovery and maize yield in a tropical soil [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 247: 54–62.
- [27] 孙兵. 微胶囊硝化抑制剂在东北春玉米使用效果研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- [28] Sahrawat K L, Keeney D R, Adams S S, et al. Ability of nitrapyrin, dicyandiamide and acetylene to retard nitrification in a mineral and an organic soil [J]. *Plant Soil*, 1987, 101 (2): 179–182.
- [29] Hendrickson L L, Keeney D R. A bioassay to determine the effect of organic matter and pH on the effectiveness of nitrapyrin (N-serve) as a nitrification inhibitor [J]. *Soil Biol Biochem*, 1979, 11 (1): 51–55.
- [30] Prasad R, Power J F. Nitrification inhibitors for agriculture, health, and the environment [J]. *Advance in Agronomy*, 1995, 54 (8): 233–281.
- [31] 张忠庆. 硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶新剂型制备及增效机理研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析 (3 版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [33] 王寅, 冯国忠, 张天山, 等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (3): 518–528.
- [34] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35 (11): 1361–1368.
- [35] 徐卓. 尿素硝铵溶液对春玉米产量、氮素吸收及氮素去向的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [36] 徐传银, 刘巧, 陆其通, 等. 水稻不同生育期喷施尿素硝铵溶液对产量和经济性状的影响 [J]. *现代农业科技*, 2015 (18): 17–21.
- [37] 刘学彤, 杨军芳, 黄少辉, 等. 尿素硝铵溶液对冬小麦产量及土壤无机氮含量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019 (4): 116–120.
- [38] 牛长英, 石荣媛, 朱拥军, 等. 尿素硝铵溶液在棉花上的



- 田间肥效示范 [J]. 新疆农垦科技, 2017 (2): 69-71.
- [39] 张文学, 王萍, 孙刚, 等. 脲酶抑制剂不同用量对土壤氮素供应的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (6): 38-44.
- [40] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (15): 3040-3048.
- [41] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响 [J]. 生态环境, 2003, 12 (1): 24-28.
- [42] 姜亮. 硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶微胶囊对土壤氮素转化和玉米生长的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.

Application effect of stable liquid nitrogen fertilizer in black soil with conservation tillage

WANG Gao-xu¹, TIAN Geng², ZHOU Jia-feng¹, ZHANG Xiao-yan¹, FENG Guo-zhong¹, GAO Qiang^{1*}, ZHANG Zhong-qing^{1*} (1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University/Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in Commodity Grain Base of Jilin Province, Key Laboratory of Straw Comprehensive Utilization and Black Soil Conservation, Ministry of Education, Changchun Jilin 130118; 2. Jilin Woyijia Ecological Agriculture Co. Ltd., Shuangliao Jilin 136400)

Abstract: Low nitrogen use efficiency is an important restricting factor for efficient and stable development of maize industry in the black soil area of Northeast China. The stable liquid nitrogen fertilizer was prepared with urea ammonium nitrate solution (UAN) and nitrification inhibitor 2-Chloro-6 (Trichloromethyl) pyridine microcapsule (CPCS) as material to study its effects on nitrogen absorption, utilization, growth of maize in the black soil area. Three kinds of stable liquid nitrogen fertilizers, 0.5%CPCS-UAN, 1%CPCS-UAN and 2%CPCS-UAN, were prepared with 2-Chloro-6 (Trichloromethyl) pyridine traditional emulsifiable concentrate (CPEC) as the control. Six treatments were set up in the field experiment: no nitrogen fertilizer (N0), UAN (N180), 1%CPEC-UAN (N180), 0.5%CPCS-UAN (N180), 1%CPCS-UAN (N180) and 2%CPCS-UAN (N180). The dynamic changes of soil inorganic nitrogen and plant nitrogen absorption were measured during the growth period of spring maize, and the yield and its components were measured at the maturity period of maize. The results of the field experiments in 2020 and 2021 showed that CPCS-UAN treatments significantly improved maize yield and plant nitrogen uptake. Among them, 1%CPCS-UAN treatment was the best, with maize yield and nitrogen uptake increasing by 6.38%-8.35% and 24.12-31.70 kg/hm² compared with UAN treatment, and by 5.39%-6.30% and 17.51-18.98 kg/hm² compared with 1%CPEC-UAN, respectively. The main reason for the yield increase of CPCS-UAN was the increase of grain number per panicle and 100 grain weight. In the whole growth period of maize, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in 0-20 cm soil with CPCS-UAN showed a gradually decreasing trend, and the content of NH₄⁺-N in the soil was higher than that of other treatments in each growth period. CPCS-UAN significantly reduced the apparent loss rate of nitrogen and increased the apparent utilization rate of nitrogen fertilizer. Among them, the apparent loss rate of soil nitrogen with 1%CPCS-UAN was the lowest (33.2%-34.0%), and the apparent utilization rate of nitrogen is the highest (40.9%-49.6%). In black soil, CPCS-UAN can effectively inhibit the transformation from NH₄⁺-N to NO₃⁻-N, reduce nitrogen loss, increase nitrogen absorption of maize, improve nitrogen use efficiency and increase maize yield.

Key words: maize ; urea ammonium nitrate; nitrification inhibitor 2-Chloro-6 (Trichloromethyl) pyridine microcapsule; black soil; stable liquid nitrogen fertilizer