

控释掺混尿素对土壤无机氮和油菜产量及氮素利用率的影响^①

张敬昇¹, 李冰^{1*}, 王昌全¹, 罗晶¹, 梁靖越¹,
何杰¹, 向毫¹, 尹斌², 陈剑科¹

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 2014—2015 连续两年通过大田试验研究了尿素、控释氮肥、控释掺混尿素对耕层土壤无机氮、油菜生长性状和产量、氮素利用率以及经济效益的影响, 为控释氮肥在油菜生产中的应用推广提供依据。结果表明, 较常规施肥处理相比, 各控释氮肥处理促进了油菜全生育期氮素供应, 有效提高了油菜生育中后期株高和干物质积累量, 对油菜主花序长有一定改善作用, 且控释掺混处理与单施控释氮肥处理分别显著增长油菜总角果 8.98%、6.76% (2014 年) 和 13.80%、9.43% (2015 年)。两年田间试验结果表明, 控释掺混尿素处理及控释氮肥处理显著增产 13.06%~16.70%, 氮肥表观利用率提高 23.34%~53.71%, 氮肥偏生产力提高 13.12%~16.72%, 氮肥农学利用率提高 25.60%~35.56%, 土壤氮依存率降低 10.99%~19.83%, 净利润提高 12.83%~25.31%, 且以控释掺混尿素处理效果最优。综上, 控释掺混尿素处理养分释放适宜, 增产增收效果最佳, 40% 控释氮肥 + 60% 尿素处理推广应用潜力较大。

关键词: 控释掺混尿素; 无机氮; 产量; 氮素利用率; 经济效益

中图分类号: S145.6 文献标识码: A

全球油菜生产约占油料作物总产量的 13.6%^[1], 发展油菜种植有利于缓解粮油供给与日益增长的人口数量矛盾。合理施氮可明显改善油菜株型性状、生长发育和产量水平^[2-3]。由于油菜吸氮量大以及速效尿素易迅速水解, 因此氮肥过量以及氮肥追施现象普遍, 造成了资源浪费和劳时费力^[4]。控释氮肥通过影响包膜内的尿素分子在土壤环境中的扩散通量等机制, 实现了氮素缓释且较为持续的效果^[5], 是一次性简化施肥技术的有效手段^[6]。然而单施控释氮肥一方面由于材料成本昂贵, 使得农田经济作物大面积施用范围受限^[7], 另一方面可能会造成作物生育前期供氮不足^[8], 不利于油菜生长发育。故提出控释掺混尿素的改良施氮方法, 可望协调油菜整个生育周期的氮素供应, 降低施用成本并提高农民净收益。控释掺混尿素已在小麦、玉米、油菜等作物上有一定的配施应用效果^[9-10], 近年也逐渐成为控释肥研究领域的一类热点。本研究通过连续 2 年定位大田试验, 分别设置常规施肥、控释氮肥、控释掺混尿素处理, 研究了不同氮肥处理对土壤无机氮动态变化、油菜生长性状、产量、肥料氮素利用率以及经济效益等综合影响, 以期

为控释氮肥在油菜生产中的推广应用提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区域概况

本试验分别于 2014 年 10 月至 2015 年 5 月及 2015 年 10 月至 2016 年 5 月在四川省成都市郫县古城镇花牌村(30°52'22.19"N, 103°56'5.99"E)进行, 该区域年均气温 15.7℃, 年均日照时数 1 161.5 h, 年均降雨量 963 mm, 年均无霜期 280 d。供试土壤类型为水稻土, 土壤有机质 29.80 g/kg, 全氮 1.90 g/kg, 碱解氮 114.30 mg/kg, 有效磷 12.30 mg/kg, 速效钾 58.90 mg/kg, pH 6.70。

1.2 供试材料

聚合物包膜控释氮肥(N 41.4%), 氮素释放周期约为 90 天, 由中国科学院南京土壤研究所研制; 尿素(N 46.4%), 由四川美丰化工有限公司生产; 过磷酸钙(P₂O₅ 12%), 由湖北祥云化工股份有限公司生产; 氯化钾(K₂O 60%), 由湖北宜昌涌金工贸有限公司经销。供试油菜品种为德油 5 号, 全生育期约 200 天, 移栽密度约为 10 万株/hm²。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B13)和四川省科技支撑计划项目(2012JZ0003)资助。

* 通讯作者(benglee@163.com)

作者简介: 张敬昇(1993—), 男, 重庆江北人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤氮素转化。E-mail: jove20883452@163.com

1.3 试验设计

试验共设 4 个处理: CK(不施氮肥); UR (100% 普通尿素); T1(控释氮肥 40%+ 普通尿素 60%); T2(控释氮肥 100%)。除 CK 不施氮处理外,各处理氮、磷、钾用量一致。施氮量 150 kg/hm², 施磷量 90 kg/hm², 施钾量 90 kg/hm², 氮磷钾肥均作为基肥一次性基施。试验小区面积 30 m² (5 m × 6 m)。随机排列,每个处理设 3 次重复。小区田埂设农膜,四周设保护行,避免水肥相互渗透,田间管理以当地习惯方式管理。

1.4 样品采集及测定

施肥前采集试验基础土样分析其理化性质^[11]。在施肥后第 10、20、40、60、80、100、120、150、200 天用土钻于各小区采用多点混合法采样,采集 0~30 cm 耕层土壤。土样部分进行冷藏保鲜,用于无机氮及含水率测定。

植物样于蕾薹期(施肥后约 120 天)、花期(施肥后约 150 天)、成熟期(施肥后约 200 天)取代表性样品 5 株,用于量取株高及称量干物质量。成熟期产量单打单收,计产。

土壤 NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法测定, NO₃⁻-N 采用紫外双波段比色法测定^[11]。植物样先于 105 °C 烘箱杀青 30 min,再于 70 °C 烘箱烘至恒重,测量株高并称量干物质量。

植株全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂-凯氏定氮法测定。

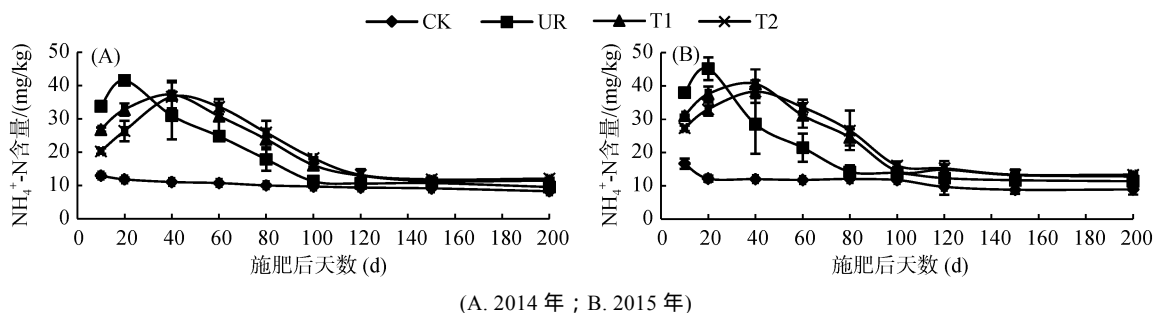


图 1 不同处理对油菜耕层土壤 NH₄⁺-N 的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on topsoil ammonium nitrogen content

2.2 不同处理对油菜耕层土壤硝态氮的影响

从图 2 可知,各施氮处理具有明显提高耕层土壤 NO₃⁻-N 含量的效果。常规施肥 UR 处理随生育期推进先增长后下降,且在 2014 年施肥后第 60 天出现一个下降速率放缓的拐点。在施肥 0~40 天, T1 处理与常规施肥 UR 处理的 NO₃⁻-N 含量接近,而 T2 处理相对较低。2014 年, T1 处理 NO₃⁻-N 含量在施肥 40 天后缓慢下降,并在第 80 天出现第二波峰值,随后逐渐下降;而 2015 年, T1 处理在第 100 天出现了第二波小峰。T2 处理在施肥 40 天后缓慢上升,并在第 80 天后缓慢下降。

1.5 计算方法

氮积累量 (kg/hm²) = 干物质量 × 氮含量 / 100

氮肥表观利用率 (NAUE, %) = (施氮区植株吸氮量 - 不施氮区植株吸氮量) / 施氮量 × 100

氮肥偏生产力 (NPP, kg/kg) = 施氮区产量 / 施氮量

氮肥农学利用率 (NAE, kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量

土壤氮依存率 (CRSN, %) = 不施氮区植株吸氮量 / 施氮区植株吸氮量 × 100

1.6 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据处理分析,采用 LSD 方法进行多重比较分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对油菜耕层土壤铵态氮的影响

如图 1 所示,施氮能有效提高耕层土壤 NH₄⁺-N 含量。随生育期推进,不施氮 CK 处理 NH₄⁺-N 含量总体趋于缓慢递减的趋势;常规施肥 UR 处理的 NH₄⁺-N 含量表现先增长后下降的特征,2014 与 2015 年均于施肥后第 20 天出现峰值后迅速下降,而分别在施肥后第 100 天和 80 天基本趋于平稳。而 T1 和 T2 处理在施肥后 40 天内, NH₄⁺-N 含量均持续上升,随后缓慢下降直至与常规施肥 UR 处理基本一致。在 2014 与 2015 年的施肥后 40 天内, T1 处理 NH₄⁺-N 含量明显高于 T2 处理,而 40 天后 T2 处理 NH₄⁺-N 含量略高于 T1 处理。

2.3 不同处理对油菜生长的影响

随生育期推进,油菜株高在花期迅速增长,成熟期明显放缓(表 1)。各生育期,施氮处理均比不施氮 CK 处理显著增长油菜株高,且 T1 与 T2 处理在各生育期无显著差异,而常规施肥 UR 处理在成熟期的株高水平均显著低于施用控释氮肥处理。油菜干物质量随生育期推进持续增加(表 1)。各生育期,较不施氮 CK 处理相比,施氮处理均显著提高油菜干物质量。常规施肥 UR 处理在成熟期的干物质量均显著低于 T1 处理,与 T2 处理无显著差异。

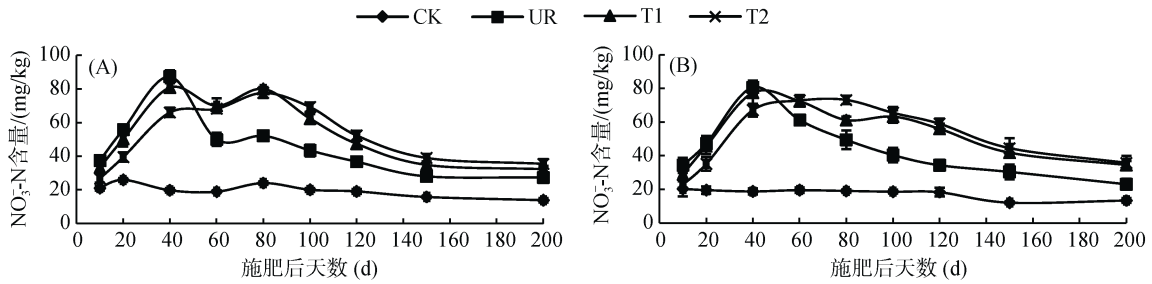


图 2 不同处理对油菜耕层土壤 NO₃-N 的影响
Fig. 2 Effects of different treatments on topsoil nitrate nitrogen content

表 1 不同处理对油菜生长的影响
Table 1 Effects of different treatments on growth indexes of rape

年份	处理	株高 (cm)			干物质量 (kg/hm ²)		
		蕾薹期	花期	成熟期	蕾薹期	花期	成熟期
2014	CK	80.51 ± 1.82 b	162.81 ± 2.90 c	168.60 ± 3.28 c	1 210.41 ± 28.10 b	2 722.35 ± 19.40 c	4 549.00 ± 29.61 c
	UR	87.04 ± 1.11 a	179.19 ± 2.59 b	182.42 ± 3.45 b	2 233.65 ± 42.60 a	4 809.03 ± 17.66 b	7 775.68 ± 212.77 b
	T1	86.95 ± 1.40 a	188.54 ± 1.65 a	193.41 ± 1.91 a	2 208.50 ± 26.90 a	4 914.70 ± 18.73 a	8 492.82 ± 381.77 a
	T2	86.54 ± 0.96 a	186.62 ± 4.67 a	190.31 ± 2.45 a	2 197.98 ± 7.96 a	4 905.68 ± 14.74 a	8 004.52 ± 193.75 b
2015	CK	79.42 ± 2.06 b	161.89 ± 4.73 b	166.48 ± 2.64 c	1 259.00 ± 29.84 b	2 659.70 ± 28.38 c	4 380.67 ± 358.12 c
	UR	88.30 ± 1.71 a	182.99 ± 2.15 a	188.28 ± 2.59 b	2 422.01 ± 23.96 a	4 939.63 ± 34.37 b	8 101.03 ± 192.87 b
	T1	88.33 ± 0.95 a	189.31 ± 2.47 a	194.66 ± 0.60 a	2 399.14 ± 13.78 a	5 091.54 ± 32.92 a	8 763.61 ± 294.39 a
	T2	86.81 ± 2.01 a	186.89 ± 2.94 a	193.04 ± 0.94 a	2 389.78 ± 24.04 a	5 056.36 ± 28.61 a	8 293.86 ± 196.06 ab

注：同列数据小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

2.4 不同处理对油菜产量构成因子的影响

除每角粒数外，各施氮处理均显著提高油菜各产量构成因子(表 2)。2014 年，各施氮处理的主花序长无显著差异，而 2015 年控释氮肥 T1、T2 处理较常规施肥 UR 处理显著增长了 2.77 和 2.78 cm。主序角

果数、每角粒数以及千粒重均表现为各施氮处理间无显著差异。而总角果数表现出控释氮肥处理均显著多于常规尿素 UR 处理，T1 与 T2 处理分别比常规尿素 UR 处理增长了 8.98%、6.76% (2014 年) 和 13.80%、9.43% (2015 年)。

表 2 不同处理对油菜产量构成因子的影响
Table 2 Effects of different treatments on yield components of rape

年份	处理	主花序长 (cm)	主序角果数	总角果数	每角粒数	千粒重 (g)
2014	CK	52.73 ± 1.25 b	74.67 ± 3.51 b	221.00 ± 11.53 c	16.67 ± 1.53 a	3.64 ± 0.06 b
	UR	56.78 ± 1.65 a	86.67 ± 3.06 a	374.67 ± 4.73 b	17.33 ± 2.08 a	3.72 ± 0.04 a
	T1	58.94 ± 0.74 a	90.00 ± 2.00 a	408.33 ± 7.37 a	18.67 ± 1.53 a	3.76 ± 0.02 a
	T2	58.71 ± 0.39 a	89.33 ± 1.15 a	400.00 ± 5.57 a	18.33 ± 1.15 a	3.75 ± 0.04 a
2015	CK	51.45 ± 1.00 c	72.67 ± 3.79 b	219.00 ± 11.36 c	16.33 ± 1.53 a	3.61 ± 0.03 b
	UR	58.15 ± 0.90 b	83.67 ± 3.06 a	389.00 ± 8.89 b	17.67 ± 1.53 a	3.70 ± 0.02 a
	T1	60.92 ± 1.22 a	87.33 ± 2.08 a	442.67 ± 11.68 a	18.33 ± 1.15 a	3.74 ± 0.04 a
	T2	60.93 ± 0.80 a	85.00 ± 2.65 a	425.67 ± 13.20 a	18.00 ± 1.00 a	3.72 ± 0.03 a

2.5 不同处理对油菜产量与经济效益的影响

由表 3 可知，各施肥处理具有显著增产的作用。与常规施肥 UR 处理相比，T1 处理连续两年的增产效果最显著，2014 与 2015 年分别增产 391.19 和 378.49 kg/hm²，提高了 16.70% 与 15.39%。T2 处理

产量水平相对次之，其 2014 年产量与 T1 处理无显著差异，与 UR 处理相比增产了 342.36 kg/hm²，提高了 14.62%；而在 2015 年的产量水平显著低于 T1 处理，但与 UR 处理相比仍增产了 321.12 kg/hm²，提高了 13.06%。

表 3 不同处理对油菜产量和经济效益的影响
Table 3 Effects of different treatments on yield and economic benefit of rape

年份	处理	产量(kg/hm ²)	产值(元/hm ²)	人工投入(元/hm ²)	肥料投入(元/hm ²)	净利润(元/hm ²)
2014	CK	1 241.33 ± 36.02 c	4 965.32	2 000	1 312.5	1 652.82
	UR	2 342.10 ± 33.38 b	9 368.4	2 000	2 039.87	5 328.53
	T1	2 733.29 ± 52.29 a	10 933.16	2 000	2 256.17	6 676.99
	T2	2 684.46 ± 36.20 a	10 737.84	2 000	2 580.62	6 157.22
2015	CK	1 205.67 ± 29.37 d	4 822.68	2 000	1 312.5	1 510.18
	UR	2 459.22 ± 40.40 c	9 836.88	2 000	2 039.87	5 797.01
	T1	2 837.71 ± 26.25 a	11 350.84	2 000	2 256.17	7 094.67
	T2	2 780.34 ± 22.69 b	11 121.36	2 000	2 580.62	6 540.74

注: 尿素 2.25 元/kg, 控释氮肥 3.5 元/kg, 磷肥 1.0 元/kg, 钾肥 3.75 元/kg, 人工成本 100 元/(人·天), 油菜籽约 4.00 元/kg。

连续两年田间试验表明,各处理的净利润表现为 T1 > T2 > UR > CK (表 3)。与常规施肥 UR 处理相比, T1 处理净利润分别提高了 25.31% (2014 年)、22.38% (2015 年), 而 T2 处理净利润分别提高了 15.55% (2014 年)、12.83% (2015 年)。

2.6 不同处理对油菜成熟期氮积累量和氮素利用率的影响

施氮可显著提高油菜成熟期氮积累量,较常规施肥 UR 处理, T1 处理两年分别显著提高了 24.74% (2014 年)、22.77% (2015 年), T2 处理分别显著提高了 15.05% (2014 年)、12.23% (2015 年) (表 4)。

表 4 不同处理对油菜成熟期氮积累量和氮素利用率的影响
Table 4 Effects of different treatments on N accumulation and nitrogen use efficiency of rape

年份	处理	氮积累量(kg/hm ²)	氮肥表观利用率 (%)	氮肥偏生产力(kg/kg)	氮肥农学利用率(kg/kg)	土壤氮依存率 (%)
2014	CK	60.81 ± 1.01 d	—	—	—	—
	UR	112.73 ± 2.35 c	34.61 ± 1.57 c	15.61 ± 0.22 b	7.34 ± 0.22 b	53.96 ± 1.13 a
	T1	140.62 ± 3.53 a	53.20 ± 2.36 a	18.22 ± 0.35 a	9.95 ± 0.35 a	43.26 ± 1.07 c
	T2	129.70 ± 4.53 b	45.92 ± 3.02 b	17.90 ± 0.24 a	9.62 ± 0.24 a	46.92 ± 1.61 b
2015	CK	57.22 ± 4.24 d	—	—	—	—
	UR	120.19 ± 4.76 c	41.98 ± 3.18 c	16.39 ± 0.27 b	8.36 ± 0.27 b	47.66 ± 1.85 a
	T1	147.56 ± 6.59 a	60.22 ± 4.40 a	18.92 ± 0.18 a	10.88 ± 0.18 a	38.83 ± 1.72 c
	T2	134.89 ± 1.91 b	51.78 ± 1.28 b	18.54 ± 0.15 a	10.50 ± 0.15 a	42.42 ± 0.60 b

与常规施肥 UR 处理相比,控释氮肥处理氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率均显著提高,而土壤氮依存率显著降低(表 4)。2014 与 2015 年, T1 处理氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率分别显著提高 53.71%、16.72%、35.56% 和 43.45%、15.44%、30.14%, 土壤氮依存率显著降低 19.83% 和 18.53%; T2 处理氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率分别显著提高 32.68%、14.67%、31.06% 和 23.34%、13.12%、25.60%, 土壤氮依存率显著降低 13.05% 和 10.99%。

3 讨论

中国的油菜生产高度依赖肥料施用^[12], 而氮肥投入过量、肥效不适时等问题导致肥料利用率低, 制约了肥料的增产增效潜力, 产生了一系列资源生态环

境问题^[13-14]。本研究结果表明,较常规施肥处理相比,各控释氮肥处理可不同程度避免尿素迅速水解释放养分的问题,协调全生育期的氮素供应。具体表现为由于旱作土壤中铵离子易受大孔隙吸附和硝化作用的多重影响^[15-16],其 NH₄⁺-N 含量变动幅度相对较小,且在施肥 40 天内,随生育期推进逐渐增长,可能降低了因一次性施入尿素造成的氮挥发损失^[17],也满足了在油菜生长前期,需要持有一定浓度 NH₄⁺-N 以保障根系发育活力^[18]。本试验中,常规施肥处理 NO₃⁻-N 含量在施肥 40 天后迅速下降,而各控释氮肥处理皆在越冬后(施肥 80 天以后)出现 NO₃⁻-N 含量的初峰或第二峰值,这一方面与控释氮肥的释放周期有关,另一方面冬季低温对控释氮肥的缓释效果也具有增强作用,一定程度有利于延长控释氮肥的缓释效果^[19]。有研究表明,油菜生育中后期的充足养分

可延缓各营养器官衰老,保持活性光合氮素占比,刺激各器官氮素积累和转运^[20-21],而各营养器官中约55%~73%的氮素会再分配至油菜籽^[22-23]。因此本试验条件下的控释氮肥氮素供应特征,对油菜增产增效的潜力更大。

株型直观反映了作物光合作用能力,与产量和构成因子紧密联系^[24],维持适当的株高有利于稳产,而干物质积累和各营养器官的氮素再分配,更是油菜高产的关键因素^[25-26]。本研究表明,施氮可显著促进油菜生长发育,促进氮素吸收,提高油菜产量水平。各控释氮肥处理由于氮素在油菜生育中后期的持续供应,对油菜株高和干物质质量的促进效果明显。且控释掺混尿素处理的增长效果优于单施控释氮肥处理,这可能是因为油菜生育初期,气温低且降水较少,单施控释氮肥的溶出速率相对受到抑制,故其在生育前期的生长受到一定缺素影响。而控释掺混尿素处理因较为适宜的掺混比例,在油菜生育前期通过尿素提供适量的速效氮养分,刺激了油菜根系生长和叶片氮素同化^[18, 27],为油菜生育中后期茁壮生长提供条件。在油菜干物质和氮积累量迅速增长时期,配施的控释氮肥仍可持续供应养分,促进了籽粒充实时间,协调各器官间动态源库关系,优化了角果等发育^[28],明显增强单株生产力^[29],本试验油菜产量构成结论与此基本一致。因此,控释掺混尿素处理较为全面协调了作物全生育期的氮素需求,既适当提高株高,有利于后期花序长度增长^[30],又明显增加干物质质量,达到大群体库容优势,发挥增产潜力^[31-32]。

本文基于成都平原多地多年的比例筛选研究,并持续对筛选出的最佳掺混比例展开定位监测及示范试验^[33-35],具有较强的生产实际价值。两年定位试验表明,常规尿素处理的氮素供应规律不佳,其一养分高度集中在生育初期,然而油菜苗期吸氮能力相对有限^[36],降低了氮素高效利用;其二生育后期的供氮能力变弱,易造成作物缺氮脱肥,影响作物生长发育^[29],产量与氮素利用率均明显抑制。较常规施肥处理,各控释氮肥处理可显著增产13.06%~16.70%,氮肥表观利用率提高23.34%~53.71%,氮肥偏生产力提高13.12%~16.72%,氮肥农学利用率提高25.60%~35.56%,土壤氮依存率降低10.99%~19.83%,净利润提高12.83%~25.31%,与王素萍等^[37]的试验结果相似。本试验条件下,各控释氮肥基本实现了氮素供应与油菜对氮素营养同步吸收。控释掺混尿素处理产量最高,且肥料成本较单施控释氮肥处理相对适中,经济效益高,有利于农民推广应用。

4 结论

一次性基施控释掺混尿素(40%控释氮肥+60%尿素)克服了单施控释氮肥材料成本过高的问题,且氮素供应在油菜全生育期较为充足且持续,避免了作物生育前期可能出现的缺氮脱肥,并有效实现了增产增收和提高肥料利用率的效果。

参考文献:

- [1] 王汉中, 殷艳. 我国油料产业形势分析与发展对策建议[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 414-421
- [2] Li X H, Li Q B, Yang T W, et al. Responses of plant development, biomass and seed production of direct sown oilseed rape (*Brassica napus*) to nitrogen application at different stages in Yangtze River Basin[J]. Field Crops Research, 2016, 194: 12-20
- [3] 晋晨, 李苗苗, 葛家颖, 等. 薹肥施用时期对垄作摆栽油菜群体结构的影响[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(1): 98-103
- [4] Malagoli P, Laine P, Rossato L, et al. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest[J]. Annals of Botany, 2005, 95: 853-861
- [5] Trinh T H, Kushaari K, Shuib A S, et al. Modeling the release of nitrogen from controlled release fertilizer: Constant and decay release[J]. Biosystems Engineering, 2015, 130: 34-42
- [6] Ni X Y, Wu Y J, Wu Z Y, et al. A novel slow-release urea fertilizer: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115: 274-282
- [7] Alva A K, Paramasivam S, Obreza T A, et al. Nitrogen best management practice for citrus trees I. Fruit yield, quality, and leaf nutritional status[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 107: 233-244
- [8] Ângelo R M, Helga S, Sérgio R, et al. Slow-release N fertilisers are not an alternative to urea for fertilisation of autumn-grown tall cabbage[J]. European Journal of Agronomy, 2010, 32: 137-143
- [9] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 52-62
- [10] Noelsch A J, Motavalli P P, Nelson K A, et al. Corn response to conventional and slow-release nitrogen fertilizers across a Claypan Landscape[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 607-614
- [11] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012
- [12] Wang W N, Lu J W, Ren T, et al. Inorganic fertilizer application ensures high crop yields in modern agriculture:

- A large scale field case study in central China[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2012, 10(2): 703–709
- [13] 鲁剑巍. 中国油菜生产的高产高效氮素管理[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(18): 3504–3505
- [14] 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 of the United States of America*, 2009, 106: 3041–3046
- [15] Mostafa M, Hadi M, Gholamabbas S, et al. Transport of nitrate and ammonium ions in a sandy loam soil treated with potassium zeolite - Evaluating equilibrium and non-equilibrium equations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34: 342–350
- [16] Jay E R, Thomas R F, Brian D S, et al. Ammonia volatilization following nitrogen fertilization with enhanced efficiency fertilizers and urea in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations of the southern United States[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 376: 247–255
- [17] Magali S M, Mónica B B, Hebe S C, et al. Nitrification and ammonia-oxidizing bacteria shift in response to soil moisture and plant litter quality in arid soils from the Patagonian Monte[J]. *Pedobiologia*, 2016, 59: 1–10
- [18] Jing J, Rui Y, Zang F, et al. Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedling by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification[J]. *Field Crops Research*, 2010, 119: 355–364
- [19] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice–oilseed rape rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 65–73
- [20] Li D, Tian M, Cai J, et al. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings[J]. *Plant Growth Regulation*, 2013, 70(3): 257–263
- [21] 刘涛, 鲁剑巍, 任涛, 等. 适宜氮水平下冬油菜苗期不同叶位叶片光合氮分配特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(18): 3532–3541
- [22] Gombert J, Le D F, Lothier J, et al. Effect of nitrogen fertilization on nitrogen dynamics in oilseed rape using ¹⁵N-labeling field experiment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173: 875–884
- [23] Malagoli P, Laine P, Rossato L, et al. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest[J]. *Annals of Botany*, 2005, 95: 853–861
- [24] Li F, Chen B Y, Xu K, et al. A genome-wide association study of plant height and primary branch number in rapeseed (*Brassica napus*)[J]. *Plant Science*, 2016, 242: 169–177
- [25] Maddonni G, Chelle M, Drouet J L, et al. Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: Simulations and crop measurements[J]. *Field Crops Research*, 2001, 70(1): 1–13
- [26] 王寅, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 江浙油菜主产区冬油菜的区域适宜施氮量研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 50–61
- [27] Zhang Z H, Song H X, Liu Q, et al. Distribution characters of absorption nitrogen in oilseed rape (*Brassica napus* L.) at different growth stages[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37: 1648–1660
- [28] 明日, 鲁剑巍, 任涛, 等. 施氮提高直播冬油菜主序不同部位角果生产力[J]. *中国油料作物学报*, 2016, 38(3): 355–361
- [29] 王寅, 李雅颖, 鲁剑巍, 等. 栽培模式对直播油菜生长、产量和养分吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 597–607
- [30] 谢田田, 陈玉波, 黄吉祥, 等. 甘蓝型油菜不同发育时期株高 QTL 的动态分析[J]. *作物学报*, 2012, 38(10): 1802–1809
- [31] Diepenbronck W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) : A review[J]. *Field Crops Research*, 2000, 67: 35–49
- [32] 杨安中, 吴文革, 李泽福, 等. 氮肥运筹对超级稻库源关系、干物质积累及产量的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 254–258
- [33] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 不同控氮比掺混肥对土壤无机氮与脲酶及冬小麦产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 159–164
- [34] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释掺混氮肥对稻麦作物生长和产量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(8): 1287–1296
- [35] 付月君, 王昌全, 李冰, 等. 控释氮肥与尿素配施对单季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 648–652
- [36] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 111–124
- [37] 王素萍, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 施用控释尿素对油菜籽产量、氮肥利用率及土壤无机氮含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1449–1456

Effects of Controlled Release Blend Bulk Urea on Soil Inorganic Nitrogen, Yield and Nitrogen Use Efficiency of Rape

ZHANG Jingsheng¹, LI Bing^{1*}, WANG Changquan¹, LUO Jing¹, LIANG Jingyue¹,
HE Jie¹, XIANG Hao¹, YIN Bin², CHEN Jianke¹

(1 *College of Resources, Sichuan Agriculture University, Chengdu 611130, China;*

2 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)*

Abstract: Based on a 2 year (2014—2015) fertilizer field trial, the effects of different nitrogen treatments (CK: no N, UR: 100% urea, T1: 40% controlled release urea + 60% urea, T2: 100% controlled release urea) on soil inorganic nitrogen, the growth status, yield, nitrogen use efficiency and economic benefit of rape were studied to provide reasonable references for the application of controlled release urea in rape planting. The results showed that compared with UR, T1 and T2 enhanced the nitrogen supply of soil in the whole growing stage, promoted plant height and dry matter accumulation in the mid-late growing stage, and increased the length of main inflorescence. T1 and T2 significantly increased total siliques by 8.98% and 6.76% in 2014, and by 13.80% and 9.43% in 2015, respectively. T1 and T2 significantly increased yield by 13.06% - 16.70%, increased NAUE by 23.34% - 53.71%, increased NPP by 13.12% - 16.72%, increased NAE by 25.60% - 35.56%, reduced CRSN by 10.99% - 19.83%, and increased net income by 12.83% - 25.31%. In general, T1 has the best integrated effect and is recommended for the wild application in rape planting.

Key words: Controlled release blend bulk urea; Inorganic nitrogen; Yield; Nitrogen use efficiency; Economic benefit