

邱悦, 崔静, 杨晓燕, 等. 减氮配施缓释氮肥对滴灌棉花氮素利用和产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 122-131.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.014

减氮配施缓释氮肥对滴灌棉花氮素利用和产量的影响

邱悦¹, 崔静¹, 杨晓燕², 田甜¹, 王金刚¹, 范海玲¹, 王海江¹

1. 石河子大学农学院, 石河子 8320003; 2. 太尔(广东)有限公司, 肇庆 856105

摘要 为探究减氮施肥技术和缓释氮肥在新疆滴灌棉花上的应用效果, 选用当地棉花主栽品种新陆早64号, 设置不施氮肥(H1)、常规全施尿素(H2, 300 kg/hm²)、减氮20%缓释氮肥与尿素配施(H3, 240 kg/hm²)3个处理, 分别在棉花不同生育期对棉田土壤理化性质、酶活性、无机氮含量进行测定, 并在棉花吐絮期测定棉花氮素含量, 分析减氮配施缓释氮肥对棉花氮素利用效率的影响。结果显示: 在棉花各生育时期, 减氮20%配施缓释氮肥处理0~20 cm土层团聚体稳定性显著高于常规全施尿素处理($P < 0.05$), 在0~40 cm土层H3与H2处理全氮差异不显著; 不施氮肥(H1)处理土壤酶活性在棉花全生育时期均处于较低水平, 常规全施尿素H2处理土壤脲酶活性显著高于减氮20%配施缓释氮肥(H3)处理, 过氧化氢酶活性均低于H3处理, 2个处理间蔗糖酶活性和碱性磷酸酶活性差异不显著; H3处理在40~60 cm土层铵、硝态氮含量较常规全施尿素H2处理减少了棉花生育后期氮素的淋溶损失; H3处理的氮肥利用率为45.75%, 高于H2处理($P < 0.05$), 较H2处理提高了7.87个百分点; 减氮配施缓释氮肥有利于提高棉花产量, 减氮20%配施缓释氮肥(H3)处理下棉花皮棉产量较不施氮肥(H1)处理提高了18.26%, 且铃质量、籽棉产量、皮棉产量与常规全施尿素(H2)处理差异不显著, 可实现减氮不减产。结果表明, 减氮20%施氮水平下缓释氮肥与尿素配施(H2)增强了表层土壤团聚体稳定性, 可在棉花全生育期维持较高无机氮含量, 减少了氮素淋溶损失, 有利于棉花氮肥利用率及产量的提高, 可在滴灌棉田中推广应用。

关键词 棉花; 滴灌; 缓释氮肥; 减氮; 氮素利用率; 土壤酶活性; 产量

中图分类号 S562; S143.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0122-10

新疆是我国最重要的棉花生产基地之一, 2021年新疆棉花播种面积约为250.61万hm², 占全国种植面积的82.76%; 棉花总产量达到512.9万t, 占全国棉花产量的89.5%^[1]。氮素是棉花生长过程中必需的大量元素, 氮肥的合理施用及高效管理可以提高棉花的氮肥利用率和产量, 但目前新疆氮肥施用存在施用量过大、利用率低、氮素损失严重等问题, 导致棉花产量降低、经济效益下降, 由此造成土壤环境的面源污染^[2]。

大量研究表明缓释氮肥具有缓慢释放养分、提高氮肥利用率、施用方便和污染小等特点。研究发现, 一次性基施缓释氮肥能够显著提高作物氮素利用效率和产量^[3]。但是, 缓释氮肥存在价格高、前期养分释放缓慢的问题^[4]。因此, 将尿素与缓释氮肥配

施既能满足作物前期对养分的需求, 又能降低经济成本。李玉浩等^[5]研究认为, 缓释氮肥与尿素配施可以促进作物生长发育, 增加土壤中无机氮含量和酶活性, 还能够显著提高作物产量和氮肥利用率。此外, 在减氮配施缓释氮肥对玉米的影响研究中发现, 与全施尿素或缓释氮肥相比, 减氮20%~40%尿素与缓释氮肥配施不但可以满足玉米生育期内的氮素需求, 还能够显著降低玉米生育后期的无机态氮淋溶损失, 可作为减肥增效的重要施肥方法^[6]。新疆棉田多采用膜下滴灌的随水施肥方式, 缓释氮肥一次性施用不足以维持棉花全生育时期的氮素需求, 液态脲甲醛缓释氮肥是一种新型缓释氮肥, 可在棉花不同生育时期随水滴施, 能够满足棉花全生育期的需肥特性^[7]。

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(42161042); 新疆生产建设兵团科技计划项目(2020AB018, 2023B008-10); 石河子大学高层次人才基金项目(RCZK20208)

邱悦, E-mail: 2289773396@qq.com

通信作者: 王海江, E-mail: wanghaijiang@shzu.edu.cn

目前,关于减氮配施缓释氮肥对小麦、玉米等作物生长发育、氮肥利用率及产量影响的研究较多,但减氮配施液态缓释氮肥对新疆滴灌棉田土壤无机氮含量以及棉花氮素吸收利用的报道较少。因此,本试验在前期液态缓释氮肥与化肥(尿素)配施比例研究的基础上,分析减氮配施液态缓释氮肥对新疆滴灌棉田土壤理化性质、酶活性、无机氮含量以及棉花氮肥利用率和产量构成因子的影响,以期新疆滴灌棉田合理施氮及液态缓释氮肥的应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验地点

试验区位于新疆石河子大学试验场二连(85°59'42" E, 44°19'19" N)。供试棉花品种为新陆早64号;供试氮肥为尿素和缓释氮肥,缓释氮肥为液态脲甲醛缓释氮肥(广东太尔公司研制生产,含氮量为15.52%,释放期为45 d),供试磷、钾肥分别采用重过磷酸钙(含P₂O₅ 46%)和硫酸钾(含K₂O 50%)。试验地土壤类型为灌耕灰漠土,质地为壤土,供试土壤的基本理化性质为:土壤pH值7.76,电导率205 μS/cm,有机质含量14.73 g/kg,土壤全氮含量0.73 g/kg,速效磷含量17.00 mg/kg,速效钾含量246.83

mg/kg,碱解氮含量36.75 mg/kg。

1.2 试验设计

田间试验处理是在不同比例液态脲甲醛缓释氮肥比例筛选的基础上设置^[8],共设3个处理(表1):H1:不施氮肥;H2:大田常规全施尿素(300 kg/hm²);H3:减氮20%下缓释氮肥与尿素配施(240 kg/hm²)^[8];试验采用随机区组设计,设置3个重复,共9个小区。棉花种植采用机采棉膜下滴灌模式,一膜三管六行,行距配置为(66+10) cm,毛管间距为76 cm,株距为10 cm,膜宽为2.05 m,滴灌设施、施肥罐配置、化学调控等田间管理措施与当地大田种植保持一致。棉花于2021年4月18日播种,9月25日收获,采用干播湿出的方式,播种后滴灌40 mm出苗水。棉花生长期共灌水9次,总灌水量450 mm。灌水周期为7~9 d,从开花前开始至吐絮前结束。液态缓释氮肥由于其缓释期较长,在全生育时期分3次施入,按照蕾期30%、初花期40%、盛花期30%随水滴施,本试验中20%尿素基施,其余80%尿素按照棉花全生育时期需肥规律随水滴施,蕾期3次共施用20%、初花期3次施用30%、盛花期3次施用30%;所有处理磷、钾肥用量相同,施用重过磷酸钙90 kg/hm²、硫酸钾75 kg/hm²,磷、钾肥均基施。

表1 试验处理和施肥量

处理 Treatment	施纯氮(N)量 Pure nitrogen fertilizer rate	施磷(P ₂ O ₅)量 Phosphorus application	施钾(K ₂ O)量 Potassium application rate
H1:对照,不施氮肥 No nitrogen fertilizer	0	90	75
H2:常规全施尿素(100%普通尿素) Conventional full urea(100% urea)	300	90	75
H3:60%普通尿素+20%缓释氮肥 60% urea+20% slow-release nitrogen fertilizer	240	90	75

1.3 测定项目和方法

1)土壤分析。分别在棉花苗期、蕾期、花期、铃期、吐絮期用土钻取0~60 cm土壤样品作为供试土样,每20 cm为1层。每个处理选取3个点进行采样,共3次重复。将所取土壤样品混合均匀后分为两部分:一部分鲜土立即放入冰箱4℃保存,测定土壤酶活性及无机氮含量;另一部分晾干磨细后过孔径0.25 mm筛,自然风干常温保存,用于测定土壤理化性质。

土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定;土壤硝态氮含量和土壤铵态氮含量采用0.5 mol/L KCl浸提,采用连续流动分析仪(Auto Analyzer-III,德国)

测定。

土壤机械性稳定团聚体采用干筛法测定并根据各粒级团聚体数据,计算机械稳定性团聚体平均质量直径(mean mass diameter, MMD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)、>0.25 mm团聚体含量($R_{0.25}$)。

土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性分别采用苯酚一次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、高锰酸钾滴定法、磷酸苯二钠比色法测定^[9]。

2)植株氮素含量测定。在棉花吐絮期于土壤

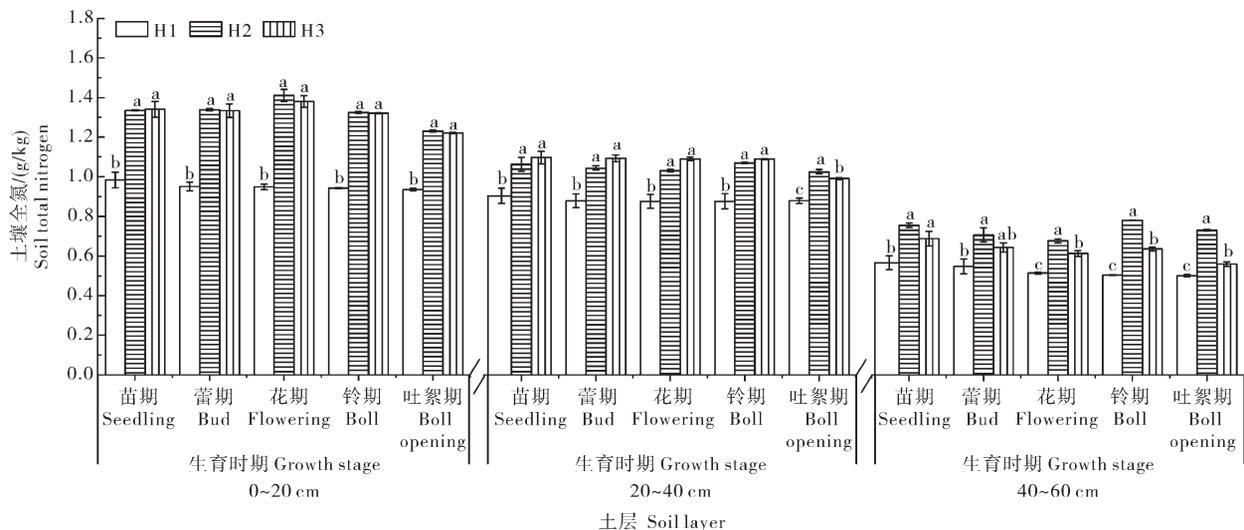
采样点周边选取有代表性植株3株,重复3次,植株样品分官茎、叶片、蕾铃3部分。样品放入105℃烘箱中杀青30 min,于85℃烘干至恒质量后粉碎,用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 进行消煮,采用半微量凯氏定氮法(K9840凯氏定氮仪)测定植物样品氮素含量^[10]。

3) 棉花产量及其构成因素测定。在棉花吐絮期每个处理按小区进行测产,统计棉花单株结铃数、铃质量、株数、籽棉产量和皮棉产量,并计算衣分。

4) 氮素利用效率的计算参照文献^[11]。

1.4 数据的统计分析

采用Excel 2019进行数据处理,用Origin 2018作图;使用SPSS 19.0进行两因素方差统计分析(two-way ANOVA),采用Duncan's法进行差异显著分析。



柱上不同字母表示相同生育时期不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。: Different letters on the column indicate significant differences among different treatments at the same growth stage ($P < 0.05$), The same below.

图1 减氮配施缓释氮肥对土壤全氮的影响

Fig.1 Effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on soil total nitrogen

$R_{0.25}$ 代表土壤大团聚体含量,土壤平均质量直径(MMD)和几何平均直径(GMD)可反映团聚体稳定性,其值越大表示团聚度越高^[12]。由表2可见,全施尿素和减氮处理土壤团聚体稳定性参数的变化不显著,蕾期到铃期0~20 cm土层施氮处理H2、H3的 $R_{0.25}$ 、MMD、GMD均高于不施氮肥H1处理,不同施肥处理下土壤机械稳定性团聚体分布均以 >0.25 mm粒径为主,减氮20%配施缓释氮肥H3处理的土壤大团聚体含量增加效果优于常规全施尿素处理。随着土层深度的增加,棉花生育时期各处理土壤团聚体参数均呈现逐渐上升的变化趋势,40~60 cm土

2 结果与分析

2.1 减氮配施缓释氮肥对土壤理化性质的影响

从图1可以看出,不施氮肥(H1)处理各土层全氮含量均显著低于常规全施尿素(H2)处理和减氮20%配施缓释氮肥(H3)处理($P < 0.05$),H3处理在0~20、20~40 cm土层与H2处理间差异不显著,而在棉花花期到吐絮期,H2处理40~60 cm土层全氮显著高于H3($P < 0.05$)。随着土层深度的增加,各施肥处理土壤全氮含量在0~20、20~40、40~60 cm土层不断降低。随着棉花生育时期的推进,H2、H3处理土壤全氮在各土层变化规律不一致,0~20 cm土层土壤全氮呈现先升高后降低的变化趋势,在棉花花期达到最大;40~60 cm土层全氮含量随棉花生育时期推进无明显变化。

层的 $R_{0.25}$ 、MMD、GMD均达到最高。随着棉花生育时期的推进,各团聚体参数变化规律不相同,在棉花苗期,H3处理各土层土壤团聚体稳定性参数与常规全施尿素H2处理差异不显著($P > 0.05$);在棉花蕾期和铃期,H3处理0~20 cm土层的 $R_{0.25}$ 显著高于H2处理($P < 0.05$),在40~60 cm土层,各施肥处理间 $R_{0.25}$ 、MMD和GMD差异不显著。

2.2 缓释氮肥与尿素配施对土壤酶活性的影响

土壤酶活性可以间接反映作物生长的土壤环境,对判定作物生长状况具有重要意义。试验结果显示,常规全施尿素H2处理土壤脲酶活性最高(图

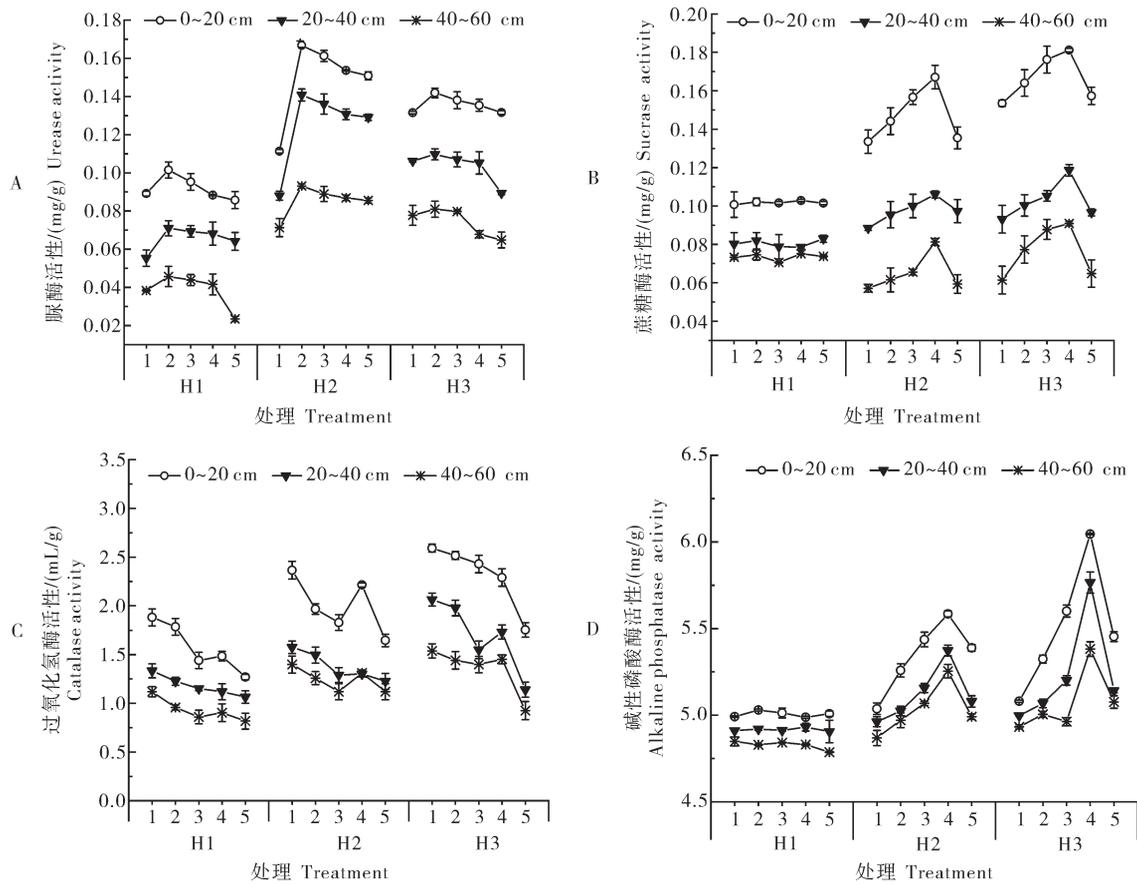
表 2 减氮配施缓释氮肥对土壤团聚体稳定性参数的影响
Table 2 Effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on soil aggregate stability parameters

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	0~20 cm			20~40 cm			40~60 cm		
		$R_{0.25}/\%$	MMD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	MMD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	MMD/mm	GMD/mm
苗期 Seedling	H1	88.57±0.59a	2.15±0.06a	1.00±0.00a	89.29±2.19a	2.33±0.04a	1.14±0.08a	89.66±2.29a	2.49±0.00a	1.31±0.06a
	H2	90.09±2.56a	2.15±0.03a	1.01±0.14a	89.56±2.07a	2.33±0.07a	1.12±0.04a	92.98±1.31a	2.48±0.03a	1.30±0.04a
	H3	95.30±0.27a	2.15±0.02a	1.01±0.07a	95.02±0.56a	2.32±0.04a	1.13±0.05a	90.42±0.96a	2.48±0.05a	1.30±0.19a
蕾期 Bud	H1	90.42±0.00b	1.31±0.01b	0.69±0.01b	92.34±1.15b	2.12±0.03b	1.16±0.06b	91.30±1.72a	2.11±0.06a	1.13±0.07a
	H2	91.62±0.99b	2.40±0.11a	1.31±0.09a	91.70±1.22ab	2.23±0.06ab	1.23±0.07ab	92.43±1.23a	2.39±0.06a	1.34±0.08a
	H3	94.73±0.39a	2.34±0.11a	1.38±0.05a	94.47±0.16a	2.37±0.15a	1.39±0.09a	93.59±0.41a	2.33±0.17a	1.35±0.13a
花期 Flowering	H1	89.04±1.22b	1.62±0.19b	0.78±0.09b	93.23±0.53a	2.42±0.09a	1.39±0.07a	93.71±0.22a	2.27±0.03a	1.27±0.02a
	H2	92.36±2.99ab	2.07±0.08a	1.14±0.16a	91.71±0.90a	2.09±0.20a	1.14±0.16a	93.62±0.78a	2.25±0.03a	1.31±0.02a
	H3	94.39±0.59a	2.35±0.01a	1.34±0.02a	93.55±0.31a	2.36±0.15a	1.35±0.12a	91.85±1.95a	2.29±0.17a	1.24±0.07a
铃期 Boll	H1	88.32±1.79b	1.39±0.06c	0.70±0.05b	93.86±0.47b	2.39±0.07b	1.36±0.06b	94.46±2.25a	2.62±0.32a	1.62±0.40a
	H2	89.10±1.36b	1.90±0.16b	0.93±0.09b	93.72±0.20b	2.45±0.05b	1.43±0.04b	91.02±0.67a	2.48±0.08a	1.31±0.07a
	H3	93.60±0.82a	2.78±0.17a	1.65±0.20a	95.51±0.79a	2.94±0.13a	1.92±0.17a	90.89±2.09a	2.49±0.27a	1.38±0.26a
吐絮期 Boll opening	H1	89.10±1.03b	1.37±0.03b	0.72±0.03b	92.75±1.25a	2.28±0.14a	1.27±0.18a	93.87±1.67b	2.47±0.14a	1.49±0.25a
	H2	94.45±0.44a	2.58±0.14a	1.59±0.08a	94.68±0.71a	2.72±0.32a	1.71±0.60a	91.29±0.78b	2.08±0.31a	1.15±0.40a
	H3	93.67±0.19a	2.58±0.25a	1.52±0.19a	95.30±1.62a	2.79±0.11a	1.83±0.19a	91.44±0.52a	2.47±0.20a	1.36±0.15a

注：同列不同字母表示相同生育时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters on the same column indicate significant differences among different treatments at the same fertility period ($P < 0.05$).

2A),在各土层均高于减氮20%配施缓释氮肥H3处理与不施氮肥H1处理;土壤蔗糖酶活性(图2B)、过氧化氢酶活性(图2C)、碱性磷酸酶活性(图2D)在H2、H3施氮水平下差异不大,不施氮肥H1处理最低。随着土层深度的增加,各施肥处理土壤酶活性在0~20、20~40、40~60 cm土层不断降低。随着棉花生育时期的推进,H1处理脲酶活性和过氧化氢酶活性逐渐降低,土壤蔗糖酶活性和碱性磷酸酶活性无明显变化,在棉花全生育时期均处于较低水平。土壤脲酶活性在棉花蕾期达到最大,H2处理在0~

20 cm土层达到0.17 mg/g,较H1和H3处理分别高出39.11%和14.88%;土壤蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性和碱性磷酸酶活性均在棉花铃期达到最大,H3处理0~20 cm土层的土壤蔗糖酶活性达到最高,0~20、20~40、40~60 cm土壤过氧化氢酶活性均高于常规全施尿素H2处理;H2和H3处理的土壤碱性磷酸酶活性高于不施氮肥H1处理,0~20、20~40、40~60 cm增幅分别为4.88%~12.13%、4.81%~11.29%、3.49%~5.77%,H2与H3处理间差异不大。



1. 苗期 Seedling; 2. 蕾期 Bud; 3. 花期 Flowering; 4. 铃期 Boll; 5. 吐絮期 Boll opening. 下同 The same as follows.

图2 减氮配施缓释氮肥对土壤脲酶(A)、蔗糖酶(B)、过氧化氢酶(C)和碱性磷酸酶(D)活性的影响

Fig.2 Effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on soil enzymes activities of urease(A), sucrase(B), catalase(C) and alkaline phosphatase(D)

2.3 减氮配施缓释氮肥对土壤无机氮的影响

土壤无机氮包括硝态氮和铵态氮,土壤硝、铵态氮是植物吸收氮素营养的主要来源,能够直接供给作物吸收利用,氮肥施用量对土壤硝、铵态氮含量影响较大。随着土层深度的增加,各处理土壤硝态氮含量逐渐降低,棉花生育期不施氮H1处理硝、铵态氮呈现减低趋势,H2、H3处理表现为前期增加、后期降低的趋势。不施氮肥H1处理土壤硝、铵态氮低于常规全施尿素H2处理和减氮20%配施缓释氮肥H3

处理。在棉花铃期,H2处理和H3处理40~60 cm土层土壤硝态氮含量比不施氮肥H1处理分别高出127.96%和32.98%,H2处理比H3处理高71.42% ($P<0.05$);全施尿素H2处理20~40 cm土层土壤铵态氮含量与H3处理差异不大,40~60 cm土壤铵态氮含量比H3和H1处理分别高出5.31%和67.22%。

2.4 减氮配施缓释氮肥对棉花氮素吸收利用效率及产量的影响

氮素表观利用率、氮素偏生产力、肥料氮贡献率

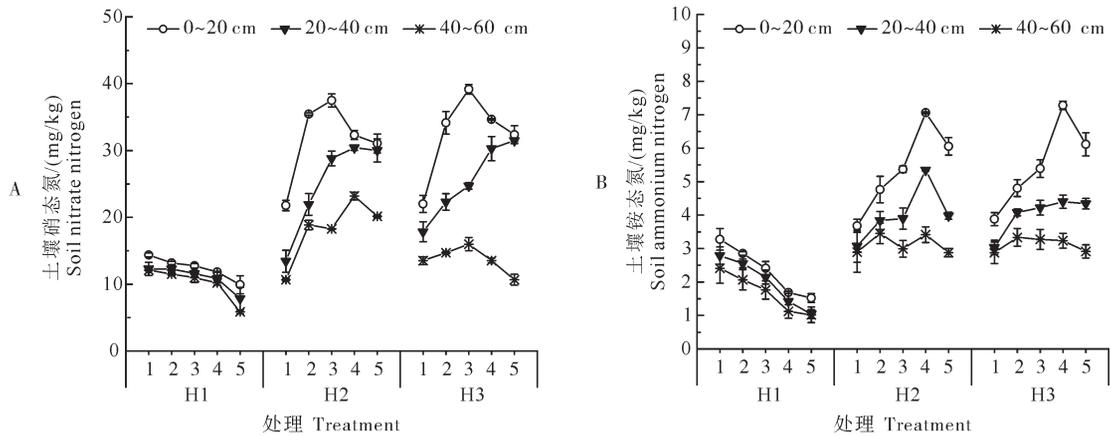


图3 减氮配施缓释氮肥对土壤无机氮的影响

Fig 3 Effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on soil inorganic nitrogen

和氮素农学效率均可以衡量棉花氮素的吸收与利用,表3显示,施氮会影响棉花的氮素表观利用率、氮肥偏生产力,肥料氮贡献率和氮素农学效率。随着施氮水平的增加,棉花的氮素表观利用率和氮素偏生产力呈现逐渐下降的变化趋势,减氮20%配施缓释氮肥(H3)处理的氮素表观利用率和氮素偏生产力最高,分别为45.75%和9.85 kg/kg,较常规全施尿素(H2)处理分别提高了7.87和14.40个百分点;肥料氮贡献率在处理间以H2处理最大,为22.50%,较H3处理提高了7.27个百分点,说明与H2处理相比,H3处理

可以通过缓慢释放氮素促进棉花对氮素的吸收,提高棉花氮肥利用率。

减氮配施缓释氮肥对棉花吐絮期单株结铃数、籽棉产量、皮棉产量和衣分均有显著的影响(表4),随着施氮水平的升高,棉花单株结铃数、铃质量、皮棉产量、籽棉产量和衣分逐渐增加,减氮20%配施缓释氮肥(H3)处理较不施氮肥(H1)处理的单株结铃数、产量和衣分均显著增加($P<0.05$),而H3处理的棉花单铃质量、籽棉产量、皮棉产量和衣分与H2处理间无显著差异。

表3 减氮配施缓释氮肥对棉花氮素吸收利用的影响

Table 3 Effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on nitrogen uptake and utilization of cotton

处理 Treatment	氮素表观利用率/% Nitrogen apparent use efficiency	氮素偏生产力/(kg/kg) Nitrogen partial productivity	肥料氮贡献率/% Nitrogen contribution rate of fertilizer	氮素农学效率/(kg/kg) Nitrogen agronomic efficiency
H1	—	—	—	—
H2	37.88±0.70	8.61±0.09	22.50±6.19	1.94±0.56
H3	45.75±0.47	9.85±0.91	15.23±2.82	1.52±0.39

表4 减氮配施缓释氮肥对棉花产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of nitrogen reduction combined with slow release nitrogen fertilizer on cotton yield and its components

处理 Treatment	单株结铃数 Bolls per plant	单铃质量/g Single boll mass	每公顷株数 Number of plants per ha	籽棉产量/(kg/hm ²) Seed cotton yield	皮棉产量/(kg/hm ²) Lint output	衣分/% Lint percentage
H1	5.76±0.09b	4.94±0.11a	241 868.02±6 395.95a	5 678.30±598.70b	1 999.58±139.08b	32.85±0.20b
H2	6.18±0.42a	5.16±0.25a	244 153.27±4 135.15a	6 644.54±108.10a	2 582.24±27.83a	38.87±0.30a
H3	5.98±0.61b	5.44±0.04a	245 615.26±3 581.14a	6 329.21±484.85a	2 364.88±218.84ab	37.32±0.87a

注:不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。Note: Different letters showed significant differences between different treatments ($P<0.05$).

2.5 棉田土壤团聚体、酶活性、氮素利用和产量的相关性分析

由表5可知,土壤全氮含量与大团聚体 $R_{0.25}$ 呈显

著正相关,与土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、土壤硝铵态氮呈极显著正相关($P<0.05$)。团聚体平均质量直径(MMD)与土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、土壤硝

表5 棉田土壤团聚体、酶活性、氮素利用和产量的相关性

Table 5 Correlation between soil aggregate, enzyme activity, nitrogen use and yield in cotton field

指标 Index	TN	$R_{0.25}$	MMD	GMD	SUA	SIA	SCA	APEA	SNN	SAN	NUE	NPP	NCF	NAE	RCY	LY
TN	1	0.765*	0.940**	0.937**	0.910**	0.946**	0.854*	0.850*	0.933**	0.931**	0.902**	0.908**	0.887**	0.913**	0.896**	0.894**
$R_{0.25}$		1	0.685	0.668	0.686	0.738	0.692	0.914**	0.651	0.638	0.593	0.599	0.617	0.628	0.848*	0.766*
MMD			1	0.947**	0.909**	0.942**	0.847*	0.787*	0.947**	0.949**	0.927**	0.932**	0.898**	0.927**	0.853*	0.870**
GMD				1	0.927**	0.933**	0.813*	0.768*	0.950**	0.946**	0.911**	0.918**	0.919**	0.940**	0.866*	0.890**
SUA					1	0.888**	0.703	0.736	0.924**	0.902**	0.828*	0.841*	0.945**	0.942**	0.905**	0.936**
SIA						1	0.885**	0.845*	0.931**	0.936**	0.924**	0.927**	0.864*	0.900**	0.863*	0.861*
SCA							1	0.843*	0.811*	0.843*	0.895**	0.889**	0.663	0.733	0.704	0.667
APEA								1	0.756	0.760	0.752	0.753	0.673	0.708	0.846*	0.775*
SNN									1	0.947**	0.914**	0.920**	0.918**	0.940**	0.856*	0.883**
SAN										1	0.932**	0.937**	0.895**	0.926**	0.831*	0.855*
NUE											1	0.950**	0.817*	0.868**	0.752	0.765*
NPP												1	0.830*	0.879**	0.764*	0.780*
NCF													1	0.943**	0.873**	0.920**
NAE														1	0.868**	0.907**
RCY															1	0.937**
LY																1

注 Note: TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; $R_{0.25}$: >0.25 mm 团聚体含量 >0.25 mm aggregate content; MMD: 平均质量直径 Mean mass diameter; GMD: 几何平均直径 Geometric mean diameter; SUA: 土壤脲酶活性 Soil urease activity; SIA: 土壤蔗糖酶活性 Soil invertase activity; SCA: 土壤过氧化氢酶活性 Soil catalase activity; APEA: 土壤碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase enzyme activities; SNN: 土壤硝态氮 Soil nitrate nitrogen; SAN: 土壤铵态氮 Soil ammonium nitrogen; NUE: 氮素表观利用率 Nitrogen apparent use efficiency; NPP: 氮素偏生产力 Nitrogen partial productivity; NCF: 肥料氮贡献率 Nitrogen contribution rate of fertilizer; NAE: 氮素农学效率 Nitrogen agronomic efficiency; RCY: 籽棉产量 Raw cotton yield; LY: 皮棉产量 Lint yield. *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。* and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

铵态氮、氮素吸收利用参数及棉花籽棉产量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), $R_{0.25}$ 与 MMD、几何平均直径 GMD、土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性和氮素农学效率相关性不显著 ($P > 0.05$), 与棉花产量显著相关 ($P < 0.05$)。土壤蔗糖酶活性与土壤过氧化氢酶、硝铵态氮含量及氮肥利用率呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 说明减氮配施缓释氮肥改善了土壤团聚体结构水平, 有利于提高土壤酶活性, 促进氮素的吸收利用和棉花产量的提高。

3 讨论

本研究结果表明, 减氮 20% 配施缓释氮肥改善了土壤理化性质, 增强了 0~40 cm 土壤团聚体稳定性, 降低了土壤脲酶活性, 提高了土壤过氧化氢酶活性, 能够保证棉花全生育时期的无机氮供应水平。减氮 20% 配施缓释氮肥显著提高了棉花氮肥利用率 ($P < 0.05$), 降低 40~60 cm 土层硝铵态氮的含量, 且

在减少 20% 施氮量水平下不影响棉花产量, 能够实现减氮不减产。

3.1 减氮配施缓释氮肥对棉田土壤酶活性的影响

土壤酶活性可以作为衡量土壤养分状况和生产力的指标, 氮肥施入土壤中能通过改变土壤酶活性来影响土壤氮的保持能力和氮肥利用率。土壤脲酶活性在一定程度上反映了土壤的供氮能力, 尿素的施入对土壤脲酶活性有显著的促进作用^[13], 但 NH_3 挥发是氮肥在脲酶作用下水解的产物, 随着脲酶活性的提高 NH_3 的挥发增大^[14], 因而, 抑制脲酶活性可能是提高氮素利用率的一种途径。本研究中, 减氮 20% 配施缓释氮肥处理 0~60 cm 土层的土壤脲酶活性显著低于常规全施尿素处理 ($P < 0.05$), 说明减氮 20% 配施缓释氮肥一定程度上降低了脲酶活性, 能够间接减少氮素的损失及 NH_3 挥发, 这与前人研究结果相一致^[15]。本研究中减氮 20% 配施缓释氮肥

处理各生育时期土壤蔗糖酶活性及碱性磷酸酶活性与全施尿素无显著差异,表明减氮20%配施缓释氮肥能够提供相当的氮源,维持土壤中物质代谢和生物活性^[16],冯爱青等^[17]研究发现,施用控释氮肥能够促进土壤蔗糖酶活性和磷酸酶活性,这可能是与种植作物、施用肥料种类、土壤环境的不同有关。本研究中减氮20%配施缓释氮肥对铃期0~20、20~40、40~60 cm土层过氧化氢酶活性有促进作用,较常规全施尿素分别提高了1.45%、8.33%和6.45%,说明减氮20%配施缓释氮肥能够增加土壤过氧化氢酶活性,原因可能是减氮配施缓释氮肥能够保持氮素的持续供应^[18],提高了土壤过氧化氢酶的活性,从而增加了土壤微生物的数量,增强了土壤解毒能力,促进了作物根系生长和土壤氮素利用效率^[19]。

3.2 减氮配施缓释氮肥对棉花氮素吸收利用及产量的影响

研究表明,随着施氮量的增加NH₃挥发造成的氮素损失也增加,将施氮量降低10%~30%可有效减少NH₃挥发损失,减氮配施缓释氮肥有利于减少NH₃挥发,维持表土中无机氮持续供应和最佳氮素利用率^[20]。本研究中,减氮20%配施缓释氮肥处理在棉花全生育期内0~40 cm土层硝、铵态氮含量与全量施氮处理差异不大,40~60 cm土层硝、铵态氮含量略有降低,说明缓释氮肥的随水滴施可以保持表层(0~40 cm)土壤中硝、铵态氮离子的数量和活性,能为棉花生长提供充足的氮素,减少了氮素向土层深处的淋溶损失,这可能是由于缓释氮肥具有缓慢释放养分的特性^[8],也可能是缓释氮肥的施用影响了土壤中微生物群落与土壤酶活性,从而改善了土壤固氮能力^[21]。本研究发现减氮配施缓释氮肥,氮素表观利用率达到45.75%,较常规全施尿素提高了7.87个百分点;氮肥偏生产力、氮素农学利用率与常规全施尿素相差不大,一方面,减氮配施缓释氮肥可以通过减少土壤深层无机氮的淋溶损失,使土壤中氮素被充分吸收利用,提高氮肥利用率^[6];另一方面,缓释氮肥与尿素配施的运筹能够与棉花生育期需肥规律更加契合,为棉花生长提供充足氮源,从而发挥了缓释氮肥的后效^[22]。

研究发现,施用缓释氮肥能够延缓棉花植株衰老,增加棉花生育后期单株结铃数、铃质量和衣分,延长了有效花铃期,从而提高产量^[8]。本研究中,减氮20%配施缓释氮肥处理的单铃质量、衣分及产量

与常规全施尿素处理差异不显著,说明减氮配施缓释氮肥可以协调棉花的营养生长和生殖生长,满足棉花需氮高峰花铃期的需求,增加了棉花的结铃数和铃质量,进而保证了棉花产量,这与前期的研究结果相似^[8]。此外,有研究表明减氮处理一定程度上对作物有减产影响,尿素减氮40%会使玉米产量减少11.5%~23.6%^[23]。不同作物减氮配施缓释氮肥的比例及其对作物提质增效的影响还有待进一步研究。

参考文献 References

- [1] 国家统计局关于2021年棉花产量的公告[N].中国信息报,2021-12-15(1).Announcement of the National Bureau of Statistics on Cotton Yield in 2021 [N].China Information, 2021-12-15 (1)(in Chinese).
- [2] WANG J J, LI R C, ZHANG H, et al. Beneficial bacteria activate nutrients and promote wheat growth under conditions of reduced fertilizer application [J/OL]. BMC microbiology, 2020, 20 (1) : 38 [2022-10-17]. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-1708-z>.
- [3] LIAO L, JIANG J, XING X, et al. Effects of slow-release fertilizers and sugarcane-specific fertilizers on yield and quality of sugarcane [J]. Asian agricultural research, 2018, 10 (6) : 72-74, 84.
- [4] DONG D, LI J, YING S S, et al. Mitigation of methane emission in a rice paddy field amended with biochar-based slow-release fertilizer [J/OL]. Science of the total environment, 2021, 792: 148460 [2022-10-17]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148460>.
- [5] 李玉浩,何杰,王昌全,等.控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响[J].土壤,2018,50(3):469-475.LI Y H, HE J, WANG C Q, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer combined with urea on soil inorganic nitrogen, microorganism and rice growth [J]. Soils, 2018, 50 (3) : 469-475 (in Chinese with English abstract).
- [6] 胡迎春,韩云良,施成晓,等.氮肥减量下缓释肥和尿素配施对黄土高原春玉米氮素利用和产量效益的影响[J].西北农业学报,2019,28(7):1068-1078.HU Y C, HAN Y L, SHI C X, et al. Improving nitrogen use efficiencies, yields and profits for spring maize by using mixtures of slow-release fertilizer and normal urea in loess plateau [J]. Acta agriculturae boreali-occidentalis sinica, 2019, 28 (7) : 1068-1078 (in Chinese with English abstract).
- [7] DÍAZ-PÉREZ J C. Slow release fertilizer has no effect on soil and plant nitrogen and fruit yield in bell pepper (*Capsicum annum* L.) [J]. Asian journal of agricultural and horticultural research, 2021: 30-37.
- [8] 邱悦,杨晓燕,李天胜,等.减氮配施缓释氮肥对棉田土壤酶

- 活性和氮素吸收利用的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):294-302.QIU Y, YANG X Y, LI T S, et al. Effects of nitrogen reduction combined with slow release nitrogen fertilizer on soil enzyme activity and nitrogen uptake in cotton field[J]. Journal of soil and water conservation, 2022, 36(3): 294-302 (in Chinese with English abstract).
- [9] 关阴萌.土壤酶及其研究方法[M].北京:农业出版社,1986:74-276.GUAN Y M. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 274-276 (in Chinese).
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [11] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen Utilization [J]. Agronomy journal, 1982, 74 (3) : 562-564.
- [12] 李锐,陶瑞,王丹,等.减氮配施有机肥对滴灌棉田土壤生物学性状与团聚体特性的影响[J].应用生态学报,2017,28(10):3297-3304.LI R, TAO R, WANG D, et al. Effect of mineral N fertilizer reduction and organic fertilizer substitution on soil biological properties and aggregate characteristics in drip-irrigated cotton field[J]. Chinese journal of applied ecology, 2017, 28(10): 3297-3304 (in Chinese with English abstract).
- [13] TIAN C, ZHOU X, DING Z L, et al. Controlled-release N fertilizer to mitigate ammonia volatilization from double-cropping rice [J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2021, 119 (1) : 123-137.
- [14] 李援农,张利,谷晓博,等.缓释氮肥减施对夏玉米产量与氮肥利用效率的影响[J].农业机械学报,2021,52(6):285-294. LI Y N, ZHANG L, GU X B, et al. Effect of reduced application of slow release nitrogen fertilizer on yield and nitrogen utilization efficiency of summer maize [J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(6): 285-294 (in Chinese with English abstract).
- [15] TIAN C, ZHOU X, DING Z L, et al. Controlled-release N fertilizer to mitigate ammonia volatilization from double-cropping rice [J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2021, 119 (1) : 123-137.
- [16] 李淑贤,鲍锦辉,姜兰,等.缓释氮肥配施脲酶抑制剂对棉花光合特征的影响[J].中国棉花,2021,48(10):1-7,14.LI S X, BAO J H, JIANG L, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer combined with urease inhibitor on photosynthetic characteristics of cotton [J]. China cotton, 2021, 48(10): 1-7, 14 (in Chinese).
- [17] 冯爱青,张民,李成亮,等.控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):177-184. FENG A Q, ZHANG M, LI C L, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on soil enzyme activities and soil nutrient utilization [J]. Journal of soil and water conservation, 2014, 28(3): 177-184 (in Chinese with English abstract).
- [18] 周媛,李平,郭魏,等.施氮和再生水灌溉对设施土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):268-273.ZHOU Y, LI P, GUO W, et al. Influence of nitrogen application and reclaimed wastewater irrigation on greenhouse soil enzyme activities [J]. Journal of soil and water conservation, 2016, 30(4): 268-273 (in Chinese with English abstract).
- [19] 高转琴,王丹,牛灵安,等.冀南平原盐渍化改造区土壤过氧化氢酶活性变化研究[J].土壤通报,2019,50(6):1434-1441. GAO Z Q, WANG D, NIU L A, et al. Soil catalase activities in salinized rehabilitation area of the southern Hebei plain [J]. Chinese journal of soil science, 2019, 50(6): 1434-1441 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张立进,巢思琴,鲁梦珍,等.优化施肥对油菜-水稻复种系统作物产量及氮磷流失的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(6):27-34.ZHANG L J, CHAO S Q, LU M Z, et al. Effects of optimized fertilization on yield of crops and loss of nitrogen and phosphorous in multiple cropping system of rape-seed-rice [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 27-34 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张金萍,陈照明,王强,等.缓释氮比例对一次性施肥单季晚稻生长和氮素利用的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):207-212,221.ZHANG J P, CHEN Z M, WANG Q, et al. Effect of slow-release nitrogen ratio on growth and nitrogen utilization of single-cropping late rice with one-time fertilization [J]. Journal of soil and water conservation, 2021, 35(6): 207-212, 221 (in Chinese with English abstract).
- [22] 周雯雯,贾浩然,张月,等.不同类型新型肥料对双季稻产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):657-668.ZHOU W W, JIA H R, ZHANG Y, et al. Effects of different new types of fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and economic benefit of double cropping rice [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2020, 26(4): 657-668 (in Chinese with English abstract).
- [23] 蒲玮,吴雅薇,张頔,等.减氮配施氮肥增效剂对土壤速效氮和玉米产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):276-283. PU W, WU Y W, ZHANG D, et al. Effects of nitrogen reduction combined with nitrogen fertilizer synergist on soil available nitrogen and corn yield [J]. Journal of soil and water conservation, 2021, 35(3): 276-283 (in Chinese with English abstract).

Effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and yield of cotton under drip irrigation

QIU Yue¹, CUI Jing¹, YANG Xiaoyan², TIAN Tian¹,
WANG Jingang¹, FAN Hailing¹, WANG Haijiang¹

1. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. Dynea (Guangdong) Co., Ltd., Zhaoqing 856105, China

Abstract Xinluzao 64, the main local cotton variety was used to study the application effect of nitrogen reduction technology and slow-release nitrogen fertilizer on cotton under drip irrigation in Xinjiang. Three treatments including no nitrogen fertilizer (H1), traditional full urea application (H2, 300 kg/hm²), and 20% slow-release nitrogen fertilizer with urea application (H3, 240 kg/hm²) were set up. The physical and chemical properties, enzyme activity and content of inorganic nitrogen in cotton field soil were measured at different stages of cotton growth. The content of nitrogen in cotton was measured at the stage of cotton boll opening. The effects of nitrogen reduction combined with slow-release nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency of cotton were analyzed. The results showed that the stability of soil aggregates in the 0-20 cm soil layer treated with H3 was significantly higher than that treated with H2 ($P < 0.05$) at each stage of cotton growth. There was no significant difference in total nitrogen between H3 and H2 treatments in the 0-40 cm soil layer. The enzyme activity in soil of H1 treatment was at a relatively low level throughout the whole period of cotton growth. The activity of urease in soil of H2 treatment was significantly higher than that of H3 treatment, while the activity of hydrogen oxide enzyme was lower than that in H3 treatment. There was no significant difference in the activity of sucrase and alkaline phosphatase between the H3 and H2 treatments. The H3 treatment reduced the leaching loss of nitrogen at the later stage of cotton growth compared to the H2 treatment. The content of ammonium and nitrate nitrogen in the soil layer of 40~60 cm in H3 treatment decreased. The nitrogen fertilizer utilization efficiency of H3 treatment was higher than that of H2 treatment ($P < 0.05$), reaching 45.75%, which was 7.87 percentage points higher than that of H2 treatment. The yield of cotton lint under H3 treatment increased by 18.26% compared to H1 treatment, and there was no significant difference in boll quality, yield of seed cotton and cotton lint compared to H2 treatment, which can achieve nitrogen reduction without yield reduction. It is indicated that H2 treatment enhances the stability of surface soil aggregates, maintains the high content of inorganic nitrogen throughout the whole growth period of cotton, reduces the leaching loss of nitrogen, and is beneficial for improving the nitrogen fertilizer utilization efficiency and yield of cotton. It can be popularized in cotton fields under drip irrigation.

Keywords cotton; drip irrigation; slow-release nitrogen fertilizer; nitrogen reduction; nitrogen utilization efficiency; enzyme activity in soil; yield

(责任编辑: 张志钰)