

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

邱悦¹，杨晓燕²，李天胜¹，李文瑞玉¹，王唯举¹，王海江¹

(1.石河子大学农学院,绿洲生态农业兵团重点实验室,新疆 石河子 832000;2.太尔(广东)有限公司,广东 肇庆 856105)

摘要:为探明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,通过试验研究减氮、配施不同比例缓释氮肥对棉花土壤理化性质、酶活性、无机氮含量、氮肥利用率及棉花产量的影响。试验选用“新陆早 64 号”棉花品种,设置 2 种施氮方式,分别为常规全施尿素(T2)和缓释氮肥与尿素不同比例配施(US),配施处理按照施氮量设 3 个水平,分别为不减氮 $U_{0.8}S_{0.2}$ (T3)、 $U_{0.6}S_{0.4}$ (T4),减氮 20% $U_{0.6}S_{0.2}$ (T5)、 $U_{0.4}S_{0.4}$ (T6),减氮 40% $U_{0.4}S_{0.2}$ (T7)、 $U_{0.2}S_{0.4}$ (T8),不施氮肥(T1)为对照,共 8 个处理。对棉花不同生育期内土壤的理化性质、酶活性、无机氮含量及成熟期棉花氮素含量和产量进行测定与分析,并计算氮肥利用率。结果表明:与常规全施尿素相比,配施缓释氮肥能显著提高土壤含水量和全氮含量,其中,以缓释氮肥与尿素 4:6 配施(T4)处理的土壤含水量最大,较常规全施尿素(T2)在棉花苗期、蕾期、花期、铃期和吐絮期分别提高了 14.07%,11.05%,7.58%,6.22%,6.65%;T4 处理的土壤全氮在花期显著高于常规全施尿素(T2)处理,达到 1.24 g/kg。减氮 20%配施缓释氮肥(T5、T6)处理各生育时期的土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性和铵硝态氮含量与常规全施尿素(T2)间无显著差异,减氮 20%配施缓释氮肥(T5、T6)处理成熟期土壤脲酶活性与硝态氮含量较不减氮 T4 处理分别减少了 28.20%,26.40%和 11.13%,8.32%。此外,减氮 20%(T5、T6)处理的氮肥利用率显著高于常规全施尿素(T2)处理,分别为 62.09%和 62.43%,产量及其构成因素与常规全施尿素(T2)间无显著差异。综上,减氮 20%配施缓释氮肥(T5、T6)处理与常规全施尿素(T2)处理相比土壤酶活性、无机氮含量及产量差异不显著,氮肥利用率显著高于 T2 处理,可以确保棉花全生育期的氮素供给,避免氮素的大量浪费,达到棉花高产及氮肥高效利用的目的。

关键词:棉花;缓释氮肥;减氮;土壤酶活性;土壤无机氮;氮素利用

中图分类号:S562;S143.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)03-0294-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.03.042

Effects of Nitrogen Reduction Combined with Slow Release Nitrogen Fertilizer on Soil Enzyme Activity and Nitrogen Uptake in Cotton Field

QIU Yue¹, YANG Xiaoyan², LI Tiansheng¹, LI Wenruiyu¹, WANG Wei ju¹, WANG Haijiang¹

(1.College of Agriculture Shihezi University,Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture Corps, Shihezi, Xinjiang 832000; 2.Dygea (Guangdong) Co., Ltd., Zhaoqing, Guangdong 856105)

Abstract: In order to explore the effects of nitrogen reduction combined with slow release nitrogen fertilizer on soil enzyme activity and nitrogen absorption and utilization in cotton field, the effects of nitrogen reduction and different proportions of slow release nitrogen fertilizer on soil physical and chemical properties, enzyme activity, inorganic nitrogen content, nitrogen use efficiency and cotton yield were studied. The cotton variety “Xinluzao 64” was used in the experiment. Two nitrogen application methods were set up: The conventional total urea (T2) and slow release nitrogen fertilizer combined with urea (US). The combined application treatments were set at three levels according to the nitrogen application rate, namely, no nitrogen reduction, $U_{0.8}S_{0.2}$ (T3) and $U_{0.6}S_{0.4}$ (T4) (the subscript values refer to the proportion of urea and slow release fertiler in the total nitrogen); nitrogen reduction of 20%, $U_{0.6}S_{0.2}$ (T5) and $U_{0.4}S_{0.4}$ (T6); nitrogen reduction of 40%, $U_{0.4}S_{0.2}$ (T7) and $U_{0.2}S_{0.4}$ (T8); and no nitrogen application (T1) as the control, with a total of eight treatments. The soil physical and chemical properties, enzyme activity, inorganic nitrogen content, nitrogen content and yield of cotton at different growth stages were measured and analyzed, and the

收稿日期:2021-10-26
资助项目:国家自然科学基金项目(42161042);兵团科技攻关重点研发项目(2018AA004,2020AB018);石河子大学高层次人才基金项目(RCZK20208)
第一作者:邱悦(1998—),女,硕士研究生,主要从事新型肥料与现代施肥技术研究。E-mail:2289773396@qq.com
通信作者:王海江(1980—),男,教授,硕士生导师,主要从事绿洲水土资源利用研究。E-mail:wanghaijiang@shzu.edu.cn

nitrogen use efficiency was calculated. The results showed that compared with the conventional total application of urea, the combined application of slow release nitrogen fertilizer could significantly increase the soil water content and total nitrogen content. Among them, the soil water content of T4 was the highest, which was 14.07%, 11.05%, 7.58%, 6.22% and 6.65% higher than that of T2 at the seedling stage, bud stage, flowering stage, boll stage and boll opening stage of cotton, respectively. The soil total nitrogen of T4 was significantly higher than that of T2 at flowering stage, reaching 1.24 g/kg. There was no significant difference in soil urease activity, sucrase activity, catalase activity, alkaline phosphatase activity and ammonium nitrate content between the treatments of T5, T6 and T2 at each growth stage. The soil urease activity and nitrate content in the mature stage of the treatments of T5 and T6 decreased by 28.20%, 26.40% and 11.13%, 8.32%, respectively, compared with the T4. In addition, the nitrogen use efficiencies of T5 and T6 were significantly higher than that of T2, by 62.09% and 62.43%, respectively. But there was no significant difference in yield and its components. In summary, the soil enzyme activity, inorganic nitrogen content and yield of the treatment with 20% nitrogen reduction combined with slow release nitrogen fertilizer (T5, T6) were not significantly different from those of the conventional (T2), and the nitrogen use efficiency was significantly higher, which could ensure the nitrogen supply in the whole growth period of cotton, avoid the nitrogen waste, and achieve the purposes of high yield and efficient utilization of nitrogen fertilizer.

Keywords: cotton; slow release nitrogen fertilizer; nitrogen reduction; soil enzyme activity; soil inorganic nitrogen; nitrogen utilization

新疆是我国最大产棉区,2020年新疆棉花种植面积达到25 019.3 km²,占全国种植面积的78.9%;产量占国内总产量比重的87.3%^[1]。目前,新疆棉区实际生产中普遍存在过量施氮问题,增加农民生产成本的同时,还会导致氮肥利用率下降,氮肥残留污染环境^[2]。因此,迫切需要找到一种环境友好的策略来减少氮肥的施用,提高肥料利用效率,降低对土壤环境的危害^[3]。

缓释氮肥是一种肥效释放期较长、养分不易损失的新型化学肥料,施入土壤中可被微生物吸收和降解,增加养分有效性,使土壤养分释放与植物需求相同步,不易对土壤环境造成危害。前人^[4]研究发现,施用缓释氮肥可延迟氮肥的释放时间,提高土壤持水能力、硝化作用和氮吸附,增加作物氮素回收率^[5],还能减少N₂O和CH₄的排放、氨挥发以及氮素的淋溶损失^[6],施用缓释氮肥成为了节省肥料消耗的新趋势^[7],是环境友好的氮肥施用方法。已有研究^[4]发现,速效氮肥和缓释氮肥的适宜组合可以克服单一肥料来源的缺点,使作物获得更高产量,提高养分利用效率和土壤肥力。李玉浩等^[8]通过水稻盆栽试验发现,缓控释氮肥与尿素配施可以促进土壤中微生物繁殖,增加土壤中无机氮含量,从而提高氮肥利用率及水稻产量。缓释氮肥与尿素配施还可以增加土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性,提高土壤中铵硝态氮含量,降低作物生育后期的氮素淋溶及损失^[9]。与此同时,有研究^[10]发现,减氮20%的情况下将缓释氮肥与尿素混合施用可获得与常规施氮大致相同的产量和氮肥利用率;减氮15%将缓释氮肥与速效氮肥3:

7配施可增加土壤全氮、速效氮含量,不会使水稻吸氮量减少,可以保证水稻的稳产^[11]。

综上所述,减氮配施缓释氮肥对作物产量、氮肥利用率、土壤理化性质及无机氮含量的研究已有报道^[12],但针对新疆棉区,减氮配施缓释氮肥对滴灌棉田土壤理化性质、酶活性及氮素吸收利用的相关研究较少。因此,本研究以新疆棉花为研究对象,对比分析减氮、配施不同比例缓释氮肥对土壤理化性质、酶活性、氮肥利用率及棉花产量的影响,以期新型缓释氮肥的推广应用、棉花的合理施氮提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2020年9—12月和2021年3—7月在石河子大学农学院试验站(44°59′08″N,86°82′21″E)进行2年重复盆栽试验;供试棉花品种为“新陆早64号”;供试土壤取自于新疆石河子大学试验站连作棉田0—30 cm耕层土壤,土壤类型为灰漠土,质地为壤土。耕层土壤pH为7.76,电导率(EC_{1:5})205 μS/cm,有机质、全氮含量分别为14.73、0.73 g/kg,速效磷、速效钾、碱解氮含量分别为17.00、246.83、36.75 mg/kg。供试肥料为普通尿素(含N 46%)、重过磷酸钙(含P₂O₅ 46%)、硫酸钾(含K₂O 50%)、缓释氮肥为液态脲甲醛缓释氮肥(广东太尔公司研制生产)。试验在光照培养箱内进行,依据棉花生长发育所需最适温度、光特性,设定光照处理16 h,光照强度为13 000~15 000 lx、温度30℃;暗处理8 h、温度23℃。取22.5 kg风干土壤(过2 mm筛)装入塑料盆(直径27.5

cm,高 31 cm)中,选饱满无破损的包衣棉花种子播种在土壤均匀混合的塑料盆中,播种量为每盆播种 15 粒,3 片真叶时定苗,每盆留 3 株,装土后土层高度约为 26 cm,容重为 1.46 g/cm³。

1.2 试验设计

试验根据施氮梯度和配施比例的不同,共设置 8 个处理,氮肥采用普通尿素(U)和缓释氮肥(S),T1 为 CK 对照不施氮肥处理,T2 为 FP 常规全施尿素,采用当地大田施纯氮量为 300 kg/hm²^[13],T3 处理按照总施氮量的 80%施用尿素,20%施用液态脲甲

醛缓释氮肥,其他各处理见表 1,每个处理 6 次重复,共 48 盆。本试验所有处理磷、钾肥用量均相同,磷钾肥与土混匀后装入盆中,作为基肥在播种前一次性施入。氮肥施用方式与大田保持一致,其中普通尿素 20%基施,其余按照棉花生育期需肥规律随水施入;液态脲甲醛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%随水追施。棉花培养期间定期浇水,使土壤含水量保持在田间持水量的 65%~80%,棉花出苗后 15 天采用滴灌方式进行灌水以防止土壤板结。

表 1 试验处理和施肥量

编号	处理简写	处理内容	施纯氮(N)/ (kg·hm ⁻²)	施磷(P ₂ O ₅)/ (kg·hm ⁻²)	施钾(K ₂ O)/ (kg·hm ⁻²)
T1	CK	对照,不施氮肥	0	90	75
T2	FP	常规全施尿素(100%普通尿素)	300	90	75
T3	U _{0.8} S _{0.2}	80%普通尿素+20%缓释氮肥	300	90	75
T4	U _{0.6} S _{0.4}	60%普通尿素+40%缓释氮肥	300	90	75
T5	U _{0.6} S _{0.2}	60%普通尿素+20%缓释氮肥	240	90	75
T6	U _{0.4} S _{0.4}	40%普通尿素+40%缓释氮肥	240	90	75
T7	U _{0.4} S _{0.2}	40%普通尿素+20%缓释氮肥	180	90	75
T8	U _{0.2} S _{0.4}	20%普通尿素+40%缓释氮肥	180	90	75

1.3 测定方法

土壤采样时期分别在棉花苗期(出苗后 30 天)、蕾期(出苗后 60 天)、花期(出苗后 90 天)、铃期(出苗后 120 天)、吐絮期(出苗后 150 天)用土钻取 0—20 cm 土壤样品作为供试土样。本试验每个生育时期随机挑选 3 盆进行采样,共 3 次重复。所取土壤分为 2 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筛,自然风干常温保存,用于测定土壤理化性质。

土壤理化性质测定方法:土壤含水量采用 105 ℃烘干法测定;土壤 pH 采用电位法(水:土=2.5:1),用 pH 计(pB—10,Satorius AG,德国)测定;土壤电导率(EC)采用水土比按照 5:1 混合,用电导率仪(DDSJ—308A,上海精密科学仪器公司)测定;土壤全氮采用半微量凯氏定氮法^[14]测定。

土壤酶活性测定方法:土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和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、高锰酸钾滴定法和磷酸苯二钠比色法^[15]测定。

土壤无机氮含量测定方法: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。

棉花产量测定方法:在棉花吐絮期每盆随机选取 1 株,6 次重复共计 6 株,计算棉花产量及构成因子。

棉花植株氮素含量测定方法:在棉花吐絮期,每个处理选取代表性植株 3 株,105 ℃下杀青 30 min,

80 ℃下烘干至恒重,测定干物质量后进行粉碎,采用半微量凯氏定氮法测定植株氮素含量。氮肥利用率参照 Moll 等^[16]的计算方法。

氮肥利用率(NRE,%)=(施氮处理氮积累量—不施氮处理氮积累量)/施氮量×100%

1.4 数据的统计分析

采用 Excel 2015 软件进行数据处理和 Origin 2018 软件进行制图;使用 SPSS 19.0 软件进行双因素方差统计分析(two—way ANOVA)及相关性分析,采用 Duncan 法进行差异显著分析(P<0.05),主成分分析(PCA)在 Origin 2018 软件中进行。

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

由表 2 可知,减氮配施缓释氮肥在不同生育期,各处理土壤含水量随着生育时期的延长呈现先升高后下降的趋势,且在棉花出苗后 60 天达到最大,与不施氮肥 T1 相比,不同缓释氮肥与尿素配施处理明显增加了土壤含水量,且随着缓释氮肥配施比例的增加而增大。土壤全氮含量随棉花生育时期的推进呈现逐渐下降的趋势,在棉花出苗后 30 天达到最大,棉花出苗后 90 天不减氮 T3 和 T4 处理的土壤全氮含量比常规全施尿素 T2 高 7.41%~13.99%;减氮 20%的 T5、T6 处理间无明显差异,分别为 1.03,1.09 g/kg;减氮 40%条件下的 T7、T8 处理间差异不显著。土壤 pH、电导率随着棉花生育时期变化趋势不明显,棉花各生育时期土壤 pH 随缓释氮肥配施比例的增加未

呈现明显的规律性变化,但均以不施氮肥 T1 处理最高;各生育时期土壤电导率随着施氮水平的增加而逐渐升高,同一施氮水平下,呈现出随着缓释氮肥配施比例的增加而逐渐降低的趋势,其中不施氮肥 T1 处理的土壤电导率最小,不减氮(T2、T3、T4)处理及减氮 20%(T5、T6)处理间无显著差异;在棉花出苗后 60~150 天,不减氮(T2、T3、T4)处理及减氮 20%(T5、T6)处理土壤电导率显著高于减氮 40%(T7、T8)处理。

表 2 减氮配施缓释氮肥对土壤理化性质的影响

生育时期	处理	土壤含水量/%	pH	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
出苗后 30 天	T1	16.41±0.58b	8.08±0.29a	352.67±12.55b	0.77±0.03d
	T2	19.22±0.68ab	7.61±0.27a	535.00±19.04a	1.17±0.04bc
	T3	21.54±0.77a	7.92±0.28a	531.33±18.91a	1.22±0.04ab
	T4	22.37±0.80a	7.26±0.26a	530.67±18.89a	1.37±0.05ab
	T5	20.57±0.73ab	7.67±0.27a	525.67±18.71a	1.18±0.04bc
	T6	21.67±0.77a	7.84±0.28a	522.67±18.60a	1.16±0.04bc
	T7	19.12±0.68ab	7.45±0.27a	483.67±17.21a	1.01±0.04c
	T8	19.76±0.70ab	7.53±0.27a	480.33±17.10a	1.12±0.04bc
出苗后 60 天	T1	23.50±0.84d	8.12±0.29a	373.67±13.30c	0.75±0.03c
	T2	28.34±1.01abc	7.59±0.27a	546.67±19.46a	1.12±0.04ab
	T3	30.43±1.08ab	8.03±0.29a	545.33±19.41a	1.18±0.04ab
	T4	31.86±1.13a	7.81±0.28a	542.00±19.29a	1.30±0.05a
	T5	30.93±1.10ab	7.72±0.27a	539.33±19.20a	1.14±0.04ab
	T6	30.60±1.09ab	7.38±0.26a	537.43±19.13a	1.15±0.04ab
	T7	25.82±0.92cd	7.48±0.27a	478.33±17.02b	0.99±0.04b
	T8	27.88±0.99bc	7.51±0.27a	471.67±16.79b	1.02±0.04b
出苗后 90 天	T1	20.21±0.72b	8.30±0.30a	343.00±12.21c	0.73±0.03d
	T2	22.56±0.80ab	8.01±0.29abc	579.67±20.63a	1.07±0.04b
	T3	23.33±0.83ab	8.21±0.29ab	576.00±20.50a	1.15±0.04ab
	T4	24.41±0.87a	7.85±0.28abc	572.67±20.38a	1.24±0.04a
	T5	22.86±0.81ab	7.86±0.28abc	564.33±20.08a	1.03±0.04bc
	T6	22.88±0.81ab	7.57±0.27bc	563.40±20.05a	1.09±0.04b
	T7	21.03±0.75ab	7.48±0.27c	478.67±17.04b	0.90±0.03c
	T8	21.65±0.77ab	7.64±0.27abc	450.67±16.04b	0.91±0.03c
出苗后 120 天	T1	15.23±0.54e	8.19±0.29a	371.67±13.23c	0.71±0.03e
	T2	17.78±0.63bc	7.90±0.28abc	556.33±19.80a	0.91±0.03bcd
	T3	18.65±0.66ab	7.83±0.28abc	556.00±19.79a	1.00±0.04b
	T4	18.96±0.67a	7.54±0.27c	554.00±19.72a	1.15±0.04a
	T5	17.73±0.63bc	7.93±0.28abc	545.00±19.40a	0.94±0.03bc
	T6	17.82±0.63abc	7.98±0.28abc	543.67±19.35a	0.96±0.03bc
	T7	15.61±0.56de	7.56±0.27bc	471.00±16.76b	0.82±0.03de
	T8	16.19±0.58cd	8.11±0.29abc	465.67±16.57b	0.87±0.03cd
出苗后 150 天	T1	14.23±0.51c	8.22±0.29a	356.00±12.67c	0.68±0.02e
	T2	15.45±0.55ab	7.74±0.28ab	552.33±19.66a	0.83±0.03ce
	T3	16.28±0.58a	8.11±0.29ab	551.33±19.62a	0.97±0.03ab
	T4	16.55±0.59a	7.75±0.28ab	546.67±19.46a	1.04±0.04a
	T5	15.59±0.55ab	7.33±0.26b	538.33±19.16a	0.89±0.03bcd
	T6	16.02±0.57ab	8.01±0.28ab	535.67±19.06a	0.91±0.03bc
	T7	14.51±0.52bc	7.55±0.27ab	487.33±17.34b	0.80±0.03a
	T8	15.33±0.55bc	7.61±0.27ab	466.33±16.60b	0.84±0.03cd
方差分析	处理(T)	* *	ns	ns	* *
	生育时期(G)	* *	ns	* *	* *
	T×G	ns	ns	ns	ns

注:表中数据为平均数±标准差;同列不同小写字母表示不同配施处理间差异显著($P<0.05$);*表示 $P<0.05$ 。下同。

2.2 减氮配施缓释氮肥对土壤酶活性的影响

由图 1 可知,土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性在棉花各生育期均呈现先升高后降低的变化规律,土壤脲酶活性在棉花出苗后 60 天达到最大;土壤蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性均在棉花出苗后 120 天达到最大。土壤酶活性均随着施氮水平的升高而增加,不减氮(T2、T3、T4)处理下土壤酶活性显著高于减氮 20%(T5、T6)与减氮 40%(T7、T8)处理;减氮 20%处理显著高于减氮 40%处理。棉花出苗后 60 天土壤脲酶活性以不减氮下的 T4 处理为最高,达到 0.78 mg/g,减氮 20%的 T5、T6 处理间无明显差异,分别为 0.67、0.68 mg/g;减氮 40%条件下的 T7、T8 处理间差异不显著,同一施氮水平下,各生育期土壤脲酶活性均随着缓释氮肥比例的增加而增加。棉花出苗后 120 天土壤蔗糖酶活性和过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性均以不减氮的 T4 处理为最高,分别为 10.97 mg/g、4.47 mL/g 和 7.3 mg/g;减氮 20%的 T5、T6 处理间无明显差异;减氮 40%条件下的 T7、T8 处理间差异不显著。各生育时期对土壤蔗糖酶活性的提高幅度略有不同,总体上减氮配施缓释氮肥对土壤过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性的影响较小,不施氮肥 T1 处理的各土壤酶活性在棉花全生育期均处于较低水平。

2.3 减氮配施缓释氮肥对土壤无机氮含量的影响

2.3.1 土壤硝态氮

由图 2 可知,土壤硝态氮含量随着棉花生育时期的推进,各施肥处理总体上呈现出先上升后下降的变化趋势。土壤硝态氮含量随着施氮水平及尿素占比的升高而增加,表现为不减氮处理(T2、T3、T4)下土壤硝态氮含量显著高于减氮 20%(T5、T6)与减氮 40%(T7、T8)处理;减氮 20%处理土壤硝态氮含量显著高于减氮 40%处理。棉花出苗后 30 天,不减氮下 T2 和 T3 处理的土壤硝态氮含量显著高于 T4 处理(尿素占比 60%);减氮 20%下 T5 处理(尿素占比 60%)较 T6 处理(尿素占比 40%)高 4.87%;减氮 40%的 T8 处理土壤硝态氮含量高于 T7 处理。棉花出苗后 90 天不减氮 T4 处理的土壤硝态氮含量达到最高,比 T2 和 T3 高出 18.38%和 2.07%;减氮 20%条件下, T5、T6 处理无明显差异,分别为 16.18、16.40 mg/kg;减氮 40%条件下的 T7、T8 处理间差异不显著。

2.3.2 土壤铵态氮

由图 3 可知,各施氮处理的土壤铵态氮含量随着棉花生育时期的推进呈现先升高后降低的变化趋势。土壤铵态氮含量随着施氮水平的升高而增加,施氮处理的土壤铵态氮含量均高于不施氮肥(T1)处理,各生育时期不减氮(T2、T3、T4)处理与减氮 20%(T5、T6)处理下的土壤铵态氮含量无

显著差异,但均显著高于减氮 40%(T7、T8)处理。在同一施氮水平下,土壤铵态氮含量随着缓释氮肥配施比例的增加而增大,棉花出苗后 90 天的土壤铵态氮含量达到最大,其中以不减氮 T4 处理的土壤铵态氮含量最高,为 3.73 mg/kg;减氮 20%下 T5 与 T6 处理间无显著差异,但配施缓释氮肥比例较高的 T6 处理较 T5 处理高 4.00%;减氮 40%下 T7 与 T8 处理间土壤铵态氮含量无显著差异。

2.4 减氮配施缓释氮肥对氮肥利用率及棉花产量的影响

缓释氮肥与尿素不同配施比例处理对氮肥利用率及棉花产量均有显著影响,缓释氮肥的施用明显提高了氮肥利用率(图 4)及棉花产量(表 3)。氮肥利用率随着施氮量的减少而提高,不减氮的 T3、T4 处理与减氮 20%处理无显著差异,减氮 20%(T5、T6)处理下的氮肥利用率达到最大,分别为 62.09%和 62.44%,显著高于减氮 40%(T7、T8)处理与常规全施尿素(T2)处理。减氮 40%下 T8(缓释氮肥占比 40%)处理的氮肥利用率较 T7(缓释氮肥占比 20%)处理高 7.84%,这可能是由于 T7 处理配施的缓释氮肥比例较小导致。T3、T4 处理及减氮 20%(T5、T6)处理下的氮肥利用率均高于常规全施尿素(T2)处理,减氮配施缓释氮肥可有效提高氮肥利用率。

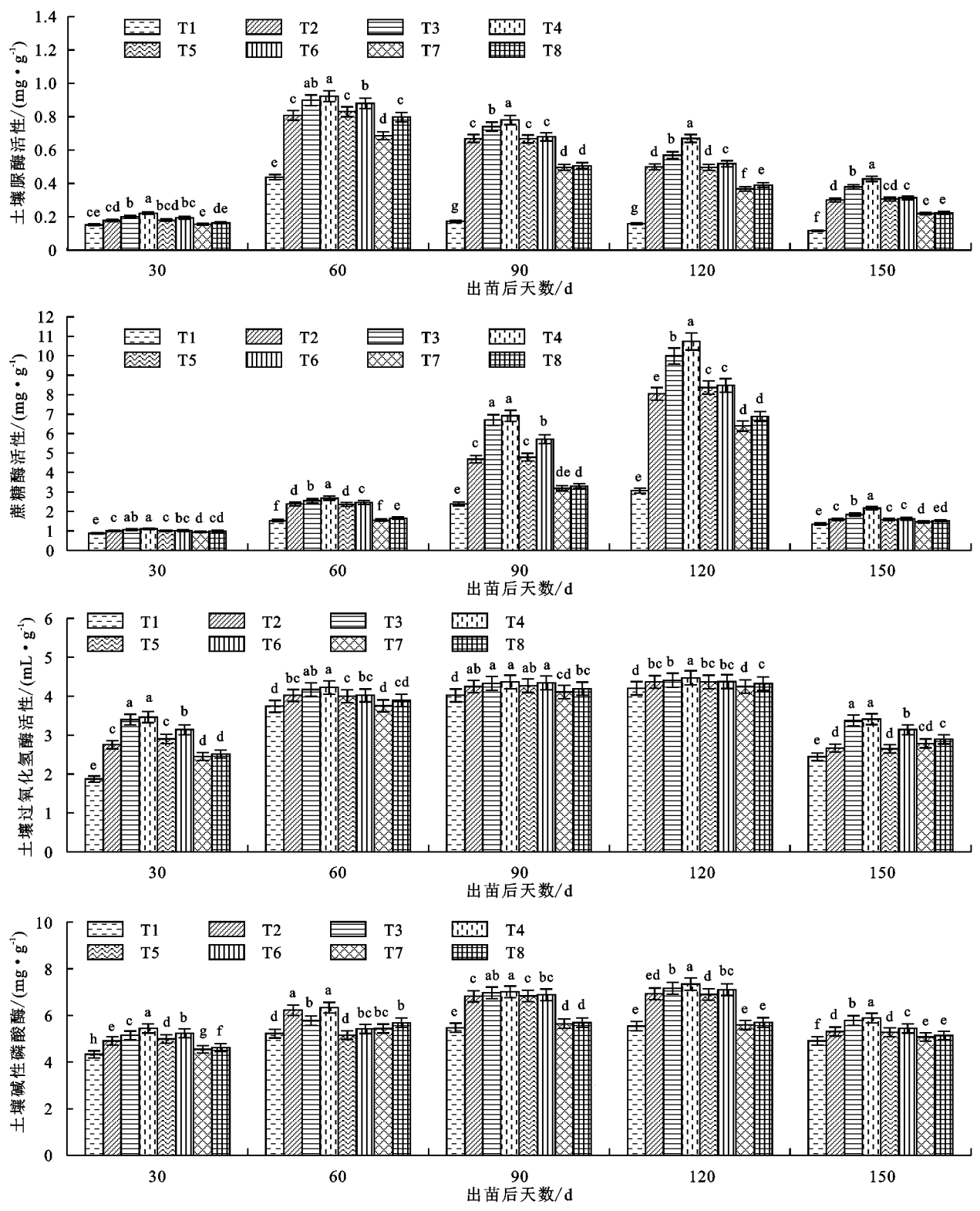
缓释氮肥对棉花产量及其构成因素有显著影响,表现为不减氮 T3、T4 处理的皮棉产量、籽棉产量、衣分显著高于减氮 20%(T5、T6)处理,减氮 20%下 T5 处理的皮棉、籽棉产量显著高于减氮 40%(T7、T8)处理,且不减氮 T3、T4 处理的皮棉产量、籽棉产量、衣分显著高于常规全施尿素(T2)处理,配施缓释氮肥比例较高的 T4(缓释氮肥占比 40%)处理的棉花结铃数、铃重、籽棉产量、皮棉产量、衣分较 T3(缓释氮肥占比 20%)处理高 5.56%, 3.18%, 0.98%, 5.31%, 4.43%;减氮 20%下 T5 与 T6 处理间无显著差异,其中缓释氮肥配施比例少的 T5(缓释氮肥占比 20%)与不减氮下常规全施尿素 T2 处理间无显著差异;减氮 40%下 T7 处理与 T8 处理间无显著差异,但 T8(缓释氮肥占比 40%)处理的棉花结铃数、铃重、籽棉产量、皮棉产量较 T7(缓释氮肥占比 20%)处理分别高 6.67%, 0.92%, 1.71%, 0.41%。

2.5 棉花产量构成因子、氮肥利用率与土壤指标的主成分分析

棉花产量构成因子、氮肥利用率与土壤指标的主成分分析(图 5)表明,第 1 主成分所解释比例为 77.1%,其中贡献率较高的指标是土壤硝态氮和土壤脲酶活性;第 2 主成解释比例为 12.1%,贡献较高的是土壤 pH 和棉花衣分, T3、T4、T5 与 T6 处理具有较高得

分。土壤理化性质中土壤含水量、全氮含量及土壤酶活性、无机氮含量与氮肥利用率及棉花产量夹角很小、相关性强。各处理间不减氮(T2、T3、T4)处理与减氮20%(T5、T6)处理的土壤理化性质、酶活性、无机氮含量、氮肥利用率及产量均较高,显著高于减氮40%处理

及不减氮 T1 处理,而土壤 pH 与棉花衣分较低;与不减氮(T2、T3、T4)处理相比,减氮 20%(T5、T6)处理皮棉与籽棉产量较低,但氮肥利用率较高,土壤硝态氮含量相似,其中 T2 处理与 T5 处理棉花产量构成因子及土壤指标含量的投影点相近,没有明显差异。



注:同组数据图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$);土壤脲酶活性以 24 h 后 1 g 风干土壤中 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的质量表示(mg/g);土壤蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 风干土生成葡萄糖的质量表示(mg/g);土壤过氧化氢酶活性以 20min 后 1 g 风干土壤消耗的 0.1 mol/L KMnO_4 的体积数表示(mL/g);土壤酸性磷酸酶活性以 24 h 后 1 g 风干土中酚的质量表示(mg/g)。

图 1 减氮配施缓释氮肥对土壤酶活性的影响

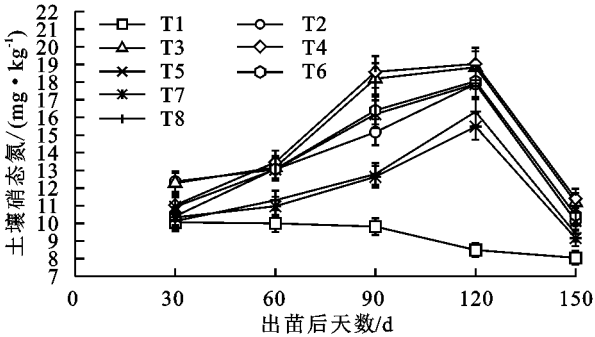


图 2 减氮配施缓释氮肥对土壤硝态氮含量的影响

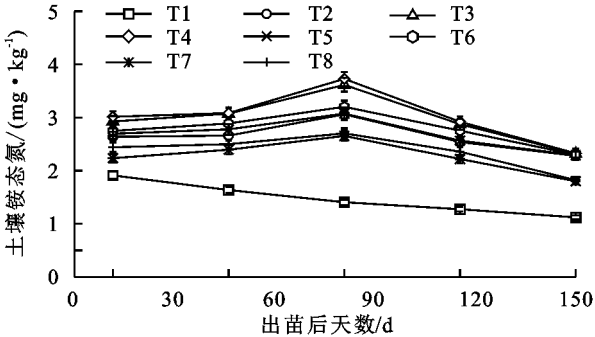


图 3 减氮配施缓释氮肥对土壤铵态氮含量的影响

3 讨论

土壤酶活性可反映土壤中微生物运动活性以及

营养物质的转化情况,可以作为衡量土壤养分状况和生
产力的指标,氮肥施入土壤中可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^[17]。土壤脲酶活
性在一定程度上反映了土壤的供氮能力,本研究表明,
在棉花各生育时期不减氮配施缓释氮肥处理土壤脲酶
活性较高,其原因可能是缓释氮肥的配施能够使氮素
持续供应,增加了土壤中根系分泌物质的数量,提高
了土壤微生物的活性,对土壤脲酶合成起到间接的促
进作用,从而增加了土壤脲酶活性^[18]。也有研究^[19]
发现,NH₃挥发是氮肥在脲酶作用下水解的产物,
NH₃挥发的可能性随着脲酶活性的增高而增大,因
而,抑制脲酶活性是提高氮素利用率的一种途径。

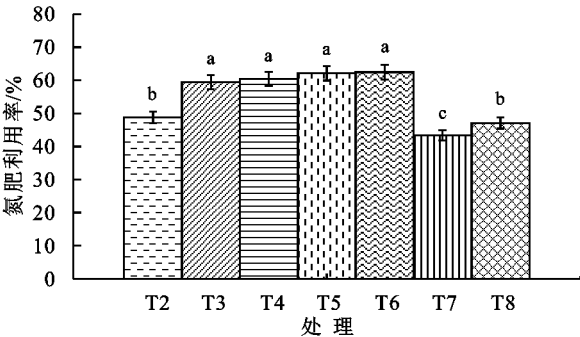
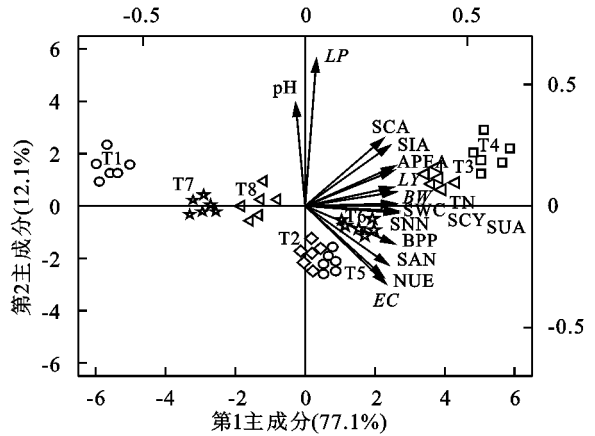


图 4 减氮配施缓释氮肥对棉花氮肥利用率的影响

表 3 减氮配施缓释氮肥对滴灌棉花产量及其构成因素的影响

处理	单株结铃数/个	单铃重/g	单株籽棉产量/g	单株皮棉产量/g	衣分/%
T1	4.00±0.58c	5.36±0.22b	43.67±1.78e	20.17±0.82d	46.18±1.19abc
T2	5.50±0.50ab	5.70±0.23ab	56.47±2.31b	24.57±1.00bc	43.51±0.96c
T3	5.50±0.50a	5.89±0.24ab	64.18±2.62a	29.43±1.20a	45.85±0.77abc
T4	5.83±0.37a	6.09±0.25a	64.82±2.65a	31.08±1.27a	47.94±1.94a
T5	5.50±0.96ab	5.72±0.23ab	56.90±2.32b	25.45±1.04b	44.73±1.25bc
T6	5.33±0.47ab	5.66±0.23ab	53.78±2.20bc	23.99±0.98bc	44.61±1.32bc
T7	4.50±0.50bc	5.36±0.22b	49.23±2.01d	22.95±0.94c	46.61±0.95ab
T8	5.00±1.15abc	5.41±0.22b	50.09±2.04cd	23.05±0.94c	46.01±0.03abc



注: SWC、pH、EC、TN、SUA、SIA、SCA、APEA、SNN、SAN、
NUE、BBP、BW、LY、SCY、LP 分别为土壤含水量、土壤
pH、土壤电导率、土壤全氮、土壤脲酶活性、土壤蔗糖酶活
性、土壤过氧化氢酶活性、土壤碱性磷酸酶活性、土壤硝态氮
含量、土壤铵态氮含量、氮肥利用率、单株结铃数、单铃重、
单株皮棉产量、单株籽棉产量、衣分。

图 5 主成分双因素分析

本研究中,减氮 20%配施缓释氮肥的处理中,T5
与 T6 处理土壤脲酶活性显著低于不减氮处理(T2、
T3、T4),较 T4 处理分别减少了 19.50%和 15.84%,
说明减氮 20%配施缓释氮肥抑制了脲酶活性的增
加,能够间接减少氮素的损失及 NH₃挥发,这与前
人^[20]研究结果一致。本研究中配施缓释氮肥对土壤蔗
糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性均有促
进作用,不减氮配施 40%缓释氮肥(T4)处理的土壤蔗糖
酶活性、过氧化氢酶活性和碱性磷酸酶活性均达到最
高,较常规全施尿素(T2)分别提高了 32.24%,2.71%和
2.72%,减氮 20%处理的各生育时期土壤蔗糖酶活性、过
氧化氢酶活性和碱性磷酸酶活性与常规全施尿素
(T2)无显著差异,说明缓释氮肥与尿素配施能够增
加土壤蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性和碱性磷酸酶活
性,这与前人^[21]研究结果相似,原因可能是缓释氮肥
具有很高的生物活性以及促生长作用,施入土壤中刺
激了土壤蔗糖酶、过氧化氢酶与碱性磷酸酶参与氮素

转换,使土壤中持续存在的氮素供应与作物需肥相同步,促进了棉花根系生长和土壤氮素的有效性,提供了充足的氮源供土壤微生物生长,使土壤微生物繁殖力与养分供应力增强的同时,增加了土壤酶活性^[22]。

土壤无机氮含量的高低在一定程度上可以反映土壤氮素养分的供给状况,有研究^[3]表明,缓释肥料能够显著降低氮损失,其结构中的残余氮被储存在土壤中供作物使用,相比于尿素,缓释氮肥的施用不仅能增加土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量及动物的食物资源,促进作物生长,还可以通过提高氮素吸收效率,使土壤氮素释放与植物需求同步,降低农田 N_2O 、 NO 排放量,减少 NH_3 挥发以及氮的淋溶损失^[23],从而提高作物产量和经济效益。本研究中,相较于常规全施尿素(T2)处理,不减氮及减氮 20%施氮水平下缓释氮肥与尿素配施处理在棉花全生育期内能够使土壤硝铵态氮持续供应,显著增加了土壤含水量和全氮含量,其中不减氮条件下 T4 处理的硝铵态氮含量显著高于常规全施尿素(T2)处理,在棉花出苗后 120 天较常规全施尿素(T2)提高 2.99%和 13.07%,说明缓释氮肥的施用可以提高氮肥利用率,长期保持土壤中硝铵态氮离子的数量和活性,可以为棉花生长提供充足的氮素,有利于土壤无机氮的供应,这与前人^[24]研究结果一致,这主要是施用缓释氮肥可以改善土壤结构和化学环境,通过持续的根团湿润延长氮素的存在,从而提高棉花氮素效率;其次,也可能与土壤微生物的固氮作用有关,还有待进一步研究。而已有研究^[20]表明, NH_3 挥发造成的氮素损失会随着施氮量的增加而增加,将施氮量降低 10%~30%可有效减少 NH_3 挥发损失;减氮配施缓释氮肥可减少 NH_3 挥发,维持表土中无机氮持续供应和最佳氮素利用率^[25];本研究发现,减氮 20%配施缓释氮肥处理(T5、T6)的土壤硝铵态氮含量在棉花生育后期高于不减氮常规全施尿素(T2)处理和减氮 40%(T7、T8)处理,对土壤无机氮的供应有促进作用,能间接减少氮素的淋溶损失。

氮肥运筹是影响棉花产量的关键因素,而不同的氮肥类型和用量能够显著改变土壤环境,这可能是影响棉花产量及氮肥利用率的重要原因之一^[26]。有研究^[27]发现,氮肥减量 10%与缓控肥配施能够显著提高玉米产量及氮肥农学效率;胡迎春等^[12]研究发现,氮肥减量 20%下缓释肥与尿素配施能够显著提高春玉米产量与氮肥利用率,这与本研究在棉花上的结果一致,本研究发现,减氮 20%配施缓释氮肥(T5、T6)处理的氮肥利用率达到最高,皮棉、籽棉产量与不减氮常规全施尿素(T2)处理差异不显著,说明减氮

20%配施缓释氮肥可以通过调控土壤供氮能力的动态变化与作物氮素需求间的协调平衡,最终提高氮肥利用率和棉花产量,实现氮素的减损增效^[28]。

土壤中微生物之间以及微生物与植物之间存在复杂的相互作用系统,在某些条件下,这些微生物可以激活土壤中的氮素养分,改变土壤酶活性及土壤结构,从而影响作物产量^[3],它们受到氮肥管理措施的显著影响,因此,研究土壤酶活性、土壤理化性质、肥料利用率及作物产量的相互关系对于探究作物高产以及肥料的高效应用至关重要。本研究结果表明,棉花产量及其构成因素与氮肥利用率、土壤全氮含量、含水量、酶活性、无机氮含量之间均具有显著正相关关系,不减氮(T3、T4)处理及减氮 20%(T5、T6)处理在主成分分析中得分较高,表明棉花的高产与土壤的酶活性及供氮能力息息相关,但本研究尚未涉及到缓释氮肥对土壤微生物群落的影响机制,需要进一步研究,且缓释氮肥在棉花上的应用效果还有待多年的田间试验进行验证。

4 结论

(1)减氮 20%配施缓释氮肥(T5、T6)处理的土壤全氮、含水量、脲酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性、无机氮含量及产量与常规全施尿素(T2)处理间无显著差异($P < 0.05$),能够确保棉花全生育期的氮素供给。此外,T5、T6 处理棉花生育后期的土壤脲酶活性和硝态氮含量显著低于不减氮(T3、T4)处理($P < 0.05$),抑制了脲酶活性及硝态氮含量的增加,能够间接减少氮素的损失,避免氮素的大量浪费。

(2)减氮 20%配施缓释氮肥(T5、T6)处理的氮肥利用率最高,棉花产量及其构成因素与不减氮下常规全施尿素(T2)处理差异不显著,可实现棉花的减氮不减产。

(3)主成分分析表明,处理间效果主要受土壤铵硝态氮、土壤酶活性、氮肥利用率及产量的影响,土壤铵硝态氮与氮肥利用率、籽棉产量显著相关,即作物可利用性氮素的持续供应有利于氮素的吸收和氮肥利用率、产量的提高。

参考文献:

- [1] 钱静斐,宋玉兰,原瑞玲,等.开放条件下我国棉花产业安全问题及发展策略[J].中国农业资源与区划,2020,41(5):140-145.
- [2] 张云舒,唐光木,蒲胜海,等.减氮配施炭基肥对棉田土壤养分、氮素利用率及产量的影响[J].西北农业学报,2020,29(9):1372-1377.
- [3] 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]. *BMC Microbiology*, 2020, 20(1): e22332.
- [4] Jia Y M, Hu Z Y, Ba Y X, et al. Application of biochar-coated urea controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2021, 8(1): e22332.
- [5] Wang S Q, Zhao X, Xing G X, et al. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(3): 1103-1115.
- [6] Nabila E K, Eisa R A, Rakha A M, et al. Evaluation of almond young trees growth and nutritional status under different slow-release compound fertilizer types and doses at nubaria region [J]. *Bulletin of the National Research Centre*, 2019, 43(1): e22332.
- [7] Yang X Y, Geng J B, Li C L, et al. Cumulative release characteristics of controlled-release nitrogen and potassium fertilizers and their effects on soil fertility, and cotton growth [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): e22332.
- [8] 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.
- [9] 郭新送, 丁方军, 陈士更, 等. 控释尿素配施微生物菌剂的氮肥利用率及土壤酶活性研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 277-282.
- [10] Fan Z, Chen J X, Zhai S, et al. Optimal blends of controlled-release urea and conventional urea improved nitrogen use efficiency in wheat and maize with reduced nitrogen application [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(2): 1103-1111.
- [11] 王雨桐. 缓释氮肥与速效氮肥配施减量对水稻生长的影响机制[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2020.
- [12] 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.
- [13] 廖娜, 侯振安, 李琦, 等. 不同施氮水平下生物碳提高棉花产量及氮肥利用率的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 782-791.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 关荫萌. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-276.
- [16] 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.
- [17] Wang J, Long Z H, Min W, et al. Metagenomic analysis reveals the effects of cotton straw-derived biochar on soil nitrogen transformation in drip-irrigated cotton field [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(2): 1-13.
- [18] 武鹏, 王玉凤, 杨克军, 等. 不同氮素形态及配比对土壤养分和酶活性及玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(5): 24-32.
- [19] 万伟帆, 李斐, 红梅, 等. 氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌马铃薯田氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 693-702.
- [20] 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(7): 129-137.
- [21] Wang X Y, Yang Y C, Gao B, et al. Slow-released bio-organic-chemical fertilizer improved tomato growth: Synthesis and pot evaluations [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(1): 1-9.
- [22] 弓建泽, 张心然, 李志勇, 等. 有机肥施用和外源镉添加对土壤理化性质、油菜生长及其镉积累的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(3): 679-685.
- [23] Chalk P M, Craswell E T, Polidoro J C, et al. Fate and efficiency of ^{15}N -labelled slow- and controlled-release fertilizers [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 102(2): 167-178.
- [24] 赵聪, 张伟, 刘化涛, 等. 减氮量施用缓释氮肥对春玉米产量及土壤硝/铵态氮含量剖面分布的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(2): 430-435.
- [25] Qu Z M, Qi X C, Shi R G, et al. Reduced N fertilizer application with optimal blend of controlled-release urea and urea improves tomato yield and quality in greenhouse production system [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(1): 1741-1750.
- [26] 杨长琴, 张国伟, 刘瑞显, 等. 氮肥运筹对麦后直播棉产量与氮素利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(12): 1607-1613.
- [27] 胡娟, 吴景贵, 孙继梅, 等. 氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 116-120, 194.
- [28] 冯小杰, 战秀梅, 王雪鑫, 等. 包膜尿素不同配比减施对土壤无机氮含量及玉米氮素吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(10): 1733-1745.