



杨长琴,束红梅,张国伟,刘瑞显,王晓婧,梁婷. 秸秆还田配施氮肥对大麦后直播棉磷钾利用与土壤磷钾平衡的影响[J]. 中国农业大学学报,2025,30(11): 195-206.

YANG Changqin, SHU Hongmei, ZHANG Guowei, LIU Ruixian, WANG Xiaojing, LIANG Ting. Effects of straw return combined with N fertilization on the P and K utilization of the direct-seeded cotton after barley and soil P and K balance[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(11): 195-206.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.11.16

秸秆还田配施氮肥对大麦后直播棉磷钾利用与土壤磷钾平衡的影响

杨长琴 束红梅 张国伟 刘瑞显* 王晓婧 梁婷

(江苏省农业科学院 经济作物研究所/农业农村部长江下游棉花与油菜重点实验室,南京 210014)

摘 要 为探明秸秆还田配施氮肥对盐碱地大麦后直播棉磷、钾利用与土壤磷钾平衡的影响,采用大田裂区试验,主区为秸秆还田量(秸秆不还田,S0;全量秸秆还田,S1),副区为不同氮肥运筹(不施氮,N0;尿素,U;控释氮肥,CRN;尿素+控释氮肥,UC),研究秸秆还田与氮肥配施对直播棉磷钾累积与利用、土壤磷钾平衡、土壤速效磷与速效钾含量的影响。结果表明:1)与S0相比,处理S1地上部与生殖器官磷钾累积量分别于盛花期后与吐絮期显著增加。施氮处理间,CRN处理地上部与生殖器官磷钾累积量盛花期较低而吐絮期较高,UC处理不同生育期地上部与生殖器官磷、钾累积量均较高;吐絮期地上部与生殖器官磷钾累积量以S1CRN与S1UC处理组合较高。较之于S1U,吐絮期S1CRN与S1UC处理组合地上部钾累积量2年均值分别提高12.9%与10.4%,生殖器官钾累积量分别提高1.9%与3.6%。2)皮棉产量以S1UC处理组合较高。秸秆还田对棉株磷、钾利用效率影响不显著,施氮处理间以UC处理磷钾利用效率较高而CRN处理较低。3)土壤磷素S0下亏缺,S1下2021年亏缺、2022年盈余;土壤钾素S0下亏缺而S1下盈余;施氮处理间以U处理磷钾盈余较高;S1UC处理组合土壤磷素与钾素表观平衡。4)S0UC、S1UC处理组合土壤速效磷与速效钾含量较低。综上,秸秆还田(6 000 kg/hm²)配施“尿素+控释氮肥”(180 kg/hm²,以纯N计)促进盐碱地大麦后直播棉对土壤速效养分利用,提高直播棉磷、钾累积与利用效率,可达到直播棉高产与土壤磷钾平衡协同。

关键词 直播棉; 秸秆还田; 氮肥运筹; 磷钾累积与利用; 磷钾平衡

中图分类号 S562

文章编号 1007-4333(2025)11-0195-12

文献标志码 A

Effects of straw return combined with N fertilization on the P and K utilization of the direct-seeded cotton after barley and soil P and K balance

YANG Changqin, SHU Hongmei, ZHANG Guowei, LIU Ruixian*,
WANG Xiaojing, LIANG Ting

(Institute of Industrial Crops/ Key Laboratory of Cotton and Rape in Yangtze River Downstream of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract This study aimed to investigate the combined effects of straw returning coupled with different nitrogen fertilization strategies on the phosphorus (P) and potassium (K) utilization efficiencies of the direct-seeded cotton after barley and the soil P and K apparent balance. A two-factor split-plot design was employed. The main plots

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)2015)

第一作者: 杨长琴(ORCID:0000-0002-7046-8122),副研究员,主要从事作物栽培与生理研究,E-mail:yqh2003@qq.com

通讯作者: 刘瑞显(ORCID:0000-0002-8255-0887),研究员,主要从事作物栽培与化学调控技术研究,E-mail:liuruixian2008@163.com

were two different straw returning rates: no straw return (S0) and full straw return (S1). The subplots were four different nitrogen fertilization strategies, which were no nitrogen fertilizer (N0), urea (U), controlled-release nitrogen (CRN), and urea+CRN (UC). The impacts of their different combinations on the P and K accumulation and utilization efficiency of direct-seeded cotton, the soil P and K apparent balance and the soil available P and K contents were investigated. The results showed that: 1) Compared to S0, the P and K accumulation of shoot and reproductive organs under S1 significantly increased after the peak blooming stage and boll-opening stage. Under nitrogen fertilization application, the treatment CRN had lower P and K accumulation at the peak squaring stage but higher values at the boll-opening stage, whereas the treatment UC exhibited consistently higher P and K accumulation across different growth stages. The direct-seeded cotton under the treatment combinations of S1CRN and S1UC exhibited higher P and K accumulation at the boll-opening stage. Compared to S1U, the two-year average K accumulation of cotton plants at the boll-opening stage in S1CRN and S1UC treatment combinations increased by 12.9% and 10.4% in shoot, respectively, and increased by 1.9% and 3.6% in reproductive organs. 2) The cotton plant under the S1UC combination had higher yields than other combinations. Compared to S0, the utilization efficiency of P and K of the cotton plant showed no significant change under S1. The utilization efficiencies of P and K of the cotton plant were higher in the UC treatment but lower in the CRN treatment under nitrogen fertilizer application. 3) The soil P was deficient under S0, while it was deficient in 2021 and surplus in 2022 under S1. The soil K was deficient under S0 and surplus under S1. The surplus of soil P and K was greater in the U treatment under nitrogen fertilizer application. The soil P and K was just in apparent balance for the treatment combination of S1UC. 4) The treatment combinations of S0UC and S1UC had lower soil available P and K content. In conclusion, the straw returning of 6 000 kg/hm² combined with UC of pure N 180 kg /hm²) facilitated the utilization of soil available nutrients, thereby improving the P and K accumulation and utilization efficiency of direct-seeded cotton after barley in coastal saline land, which achieved the synergy of high yield and the apparent balance of soil P and K.

Keywords direct-seeded cotton; straw returning; N fertilizer strategy; P and K utilization efficiency; P and K balance

麦棉两熟是长江流域棉区重要的种植制度。传统的育苗移栽棉高产高效生产往往依赖于较高肥料投入和运筹次数^[1];较之于育苗移栽棉,麦后直播棉简化施肥是促成现蕾、成铃、吐絮“三集中”、实现轻简高效生产的核心技术^[2]。在较低肥料投入下保持产量和维持土壤地力,对于植棉绿色可持续发展具有重要意义。

作物秸秆含有大量的有机质及丰富的氮、磷、钾等养分,是重要的有机肥源^[3]。秸秆还田增加了后茬作物土壤氮素的供给,利于作物生长发育^[4-5],但也有报道秸秆还田之后,出现微生物与作物争夺氮素现象,影响作物苗期生长^[4,6]。造成作物不同程度的减产^[6]。因此,秸秆还田下配施速效氮肥对促进苗期生长转化和后期产量形成尤为重要^[6]。氮肥施用是作物获得高产的重要技术措施,但常规尿素肥效快但持续期短,而控释肥能够控制养分释放速率,具有肥效长、养分利用率更高的特性^[6-7],速效氮肥+控释肥是实现简化施肥的重要技术途径。已有研究表明,秸秆还田下“尿素+控释氮肥”一次施

用是实现麦后直播棉高产和氮肥高效利用的优化策略^[6]。

磷、钾是作物生长发育所必需的矿质元素,植株对磷、钾素的吸收和利用直接影响作物产量^[8-9]。研究表明,秸秆钾素多以离子形式存在,释放速度最快^[10],磷素释放速度次于钾素^[11],秸秆还田提高土壤速效磷、速效钾含量^[12-15]。秸秆还田与不同氮肥配施下是否影响植株磷钾吸收与利用及其与产量的关系未见报道。此外,土壤养分平衡对作物的增产稳产具有关键作用^[16],已有研究发现滨海盐碱地具有有机质含量低、缺氮、贫磷、富钾的特性^[17]。秸秆还田与不同氮肥配施如何影响盐碱地土壤养分表观平衡,影响土壤养分的供给,有待研究。

较之于传统的育苗移栽棉,直播棉有效生育期短,而大麦收获期早于小麦,大麦后直播棉更利于棉花高产稳产^[18]。已有的研究主要集中于氮肥运筹或秸秆还田耦合氮肥运筹对大麦后直播棉产量及氮素利用的影响^[1,6],缺乏秸秆还田与氮肥配施对直播棉磷钾吸收、利用及土壤磷钾表观平衡的研

究。因此,本研究拟以大麦后直播棉为研究对象,以秸秆是否还田与氮肥运筹为试验因子,研究其对大麦后直播棉磷钾累积与利用、土壤磷钾平衡及土壤速效磷钾含量的影响,寻求土壤养分平衡基础上较高棉花产量与养分利用效率的秸秆管理与氮肥配施方式,以期为长江流域棉区盐碱地麦棉轮作制定科学减肥增效策略提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2021 与 2022 年江苏省盐城市大丰区大丰稻麦原种场(33.2°N,120.5°E)进行。试验田土壤为盐化潮土,质地为轻壤土。0—20 cm 土层土壤 pH 为 8.5,含盐量 0.27%,养分含量为有机质 13.5 g/kg、全氮 0.8 g/kg、速效磷 24.2 mg/kg、速效

钾 243 mg/kg。

试验采用二因素裂区设计,秸秆还田(S)为主区因子,设不还田(S0)与还田(S1)2个水平;氮肥运筹(N)为副区因子,设不施氮(N0)、尿素(U)、控释氮肥(CRN)、“尿素+控释氮肥”(UC)4个水平,见表 1。其中控释氮肥氮含量为 42%(购自山东金正大生态工程有限公司,25℃下 110 天氮素释放率达到 92%)。还田秸秆为大麦秸秆,2021 年秸秆磷与钾含量分别为 0.17% 与 1.70%,2022 年分别为 0.18% 与 1.68%。各处理施用相同量的过磷酸钙与硫酸钾,P₂O₅与 K₂O 用量分别为 115 与 180 kg/hm²。共 8 个组合处理,重复 3 次,共计 24 个小区,小区面积 28 m²。供试品种为中棉所 50,2021 与 2022 年分别于大麦收获后 5 月 26 日和 6 月 1 日播种。播种密度 9.75 万株/hm²,行距 76 cm。其他措施同高产要求。

表 1 大麦后直播棉秸秆管理与氮肥运筹的试验方案

Table 1 Experimental scheme of straw returning pattern and nitrogen fertilizer strategy of direct-seeded cotton after barley harvest

秸秆还田模式 Straw returning pattern	氮肥运筹 Nitrogen fertilizer strategy	秸秆还田量/ (kg/hm ²) Straw returning rate	施氮量/(kg/hm ²) 及氮肥类型 Nitrogen fertilizer rate and type	
			苗期 Seedling stage	初花期 Initial flowering stage
秸秆不还田(S0) No straw returning	不施氮(N0)	0	0	0
	尿素(U) Urea	0	72 U	108 U
	控释氮肥(CRN) Controlled-release nitrogen	0	180 CRN	
	尿素+控释氮肥(UC) Urea+CRN	0	72 U	108 CRN
秸秆还田(S1) Full straw returning	不施氮(N0)	6 000	0	0
	尿素(U) Urea	6 000	72 U	108 U
	控释氮肥(CRN) Controlled-release nitrogen	6 000	180 CRN	
	尿素+控释氮肥(UC) Urea+CRN	6 000	72 U	108 CRN

1.2 测定项目及方法

1.2.1 磷、钾累积及分配

于盛蕾期、盛花期和吐絮期每个小区取连续 5 株具代表性棉株,按茎枝、叶片和蕾铃等不同部位分开,105℃杀青 30 min 后于 80℃烘干至质量恒定,测定生物量。样品烘干粉碎后,分别用钼锑抗比色法^[19]和火焰光度法^[20]测定不同部位磷和钾含量。相关指标计算公式如下:

$$A_{SP}=B_S\times\omega_P\tag{1}$$

$$R_P=A_{RP}/A_{SP}\times100\tag{2}$$

$$PUE=Y/A_{SPB}\tag{3}$$

$$B_P=SF_P-A_{SP}\tag{4}$$

$$k_P=SF_P/A_{SP}\tag{5}$$

式中: A_{SP} 为地上部磷累积量,kg/hm²; B_S 为地上部生物量,kg/hm²; ω_P 为磷含量,%; R_P 为生殖器官磷分配,%; A_{RP} 为生殖器官磷累积量,kg/hm²; PUE 为磷利用效率; Y 为皮棉产量,kg/hm²; A_{SPB} 为吐絮期地上部磷累积量,kg/hm²; B_P 为土壤磷表观平衡,kg/hm²; SF_P 为秸秆与化肥磷投入总量,kg/hm²; k_P 为磷平衡系数。

钾计算公式与磷相同。

1.2.2 产量

吐絮期每小区选择生长一致的棉株15株测定成铃数;每小区收取中部30个棉铃,测定铃重和衣分,计算皮棉产量。

$$Y=n_b\times W_b\times \eta/1000 \tag{6}$$

式中:Y为皮棉产量,kg/hm²;n_b为公顷铃数,个/hm²;W_b为单铃重,g;η为衣分,%。

1.2.3 土壤速效磷与速效钾

吐絮期取0—20 cm耕层土壤,室内自然风干后磨碎过150目筛。分别用钼蓝比色法^[21]与火焰光度计法^[21]测定速效磷和速效钾含量。

1.3 统计分析方法

采用Microsoft Excel软件处理数据,用SPSS 11.0软件分析进行统计分析,用最小显著差数法

(LSD)检验平均数(P=0.05)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与不同氮肥配施对棉株磷钾累积及利用的影响

2.1.1 对大麦后直播棉磷累积及分配的影响

秸秆还田与不同氮肥配施对麦后直播棉磷累积与分配的影响结果见表2。可见棉株磷累积量随生育进程而变化:1)与S0相比,处理S1盛蕾期棉株地上部磷累积量2021年显著降低(P<0.05),2022年无显著变化,盛花期后2年地上部磷累积量显著增加(P<0.05);盛蕾期生殖器官磷累积量显著降低(P<0.05),盛花期无显著变化而吐絮期显著增加(P<0.05)。2)与S0相比,S1下盛花期前生殖器官分配系数显著降低(P<0.05),而吐絮期生

表2 秸秆还田与不同氮肥配施对麦后直播棉磷累积与分配的影响

Table 2 Effects of straw returning combined with different N fertilization on phosphorus uptake and distribution of direct-seeded cotton after barley

年份 Year	秸秆还田 模式 Straw returning pattern	氮肥运 筹 Nitrogen fertilizer strategy	A _{SP} /(kg/hm ²)			A _{RP} /(kg/hm ²)			R _P /%		
			现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	吐絮期 Boll- opening stage	现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	吐絮期 Boll- opening stage	现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	吐絮期 Boll- opening stage
2021	S0	N0	3.4 e	14.9 e	46.4 e	0.4 d	4.1 c	25.7 c	12.6 c	27.6 cd	55.3 c
		U	5.7 a	25.7 bcd	56.8 d	0.8 a	7.8 b	33.0 b	14.1 b	30.4 bc	58.2 a
		CRN	4.0 d	24.3 d	59.3 c	0.6 b	7.4 b	33.7 b	15.8 a	30.5 bc	56.8 b
		UC	4.7 bc	26.7 bc	56.5 d	0.7 b	9.2 a	32.7 b	14.2 b	34.6 a	57.8 a
	S1	N0	3.0 e	12.6 f	44.1 e	0.4 e	3.5 c	24.0 d	12.1 c	27.9 cd	54.3 d
		U	4.9 b	27.3 b	60.9 bc	0.6 b	7.6 b	35.7 a	12.5 c	27.9 cd	58.6 a
		CRN	3.9 d	25.4 cd	64.4 a	0.5 c	6.9 b	36.1 a	14.0 b	27.0 d	56.0 c
		UC	4.5 c	29.7 a	63.2 ab	0.7 b	9.7 a	36.7 a	14.8 b	32.7 ab	58.2 a
2022	S0	N0	2.5 d	22.1 f	44.3 e	0.2 c	5.4 e	24.3 e	6.4 a	24.5 ab	54.8 d
		U	3.1 ab	31.5 d	52.1 d	0.2 c	7.3 d	29.9 d	5.3 c	23.1 bc	57.4 b
		CRN	2.7 c	29.8 e	58.1 ab	0.1 d	7.3 d	32.5 bc	5.1 c	24.3 ab	56.0 c
		UC	3.0 b	32.6 c	56.9 b	0.2 b	8.4 b	33.1 b	5.8 b	25.7 a	57.1 b
	S1	N0	2.3 e	21.4 f	44.9 e	0.1 e	4.9 f	24.6 e	5.3 c	23.1 bc	54.8 d
		U	3.0 b	31.9 cd	54.5 c	0.1 d	7.8 c	31.6 c	4.5 d	24.4 ab	57.9 ab
		CRN	2.7 c	33.7 b	59.5 a	0.1 f	7.6 c	33.0 b	3.7 e	22.5 c	54.7 d
		UC	3.2 a	34.9 a	58.7 ab	0.2 a	8.7 a	34.7 a	6.2 a	24.9 a	58.7 a

注:A_{SP},地上部磷累积量;A_{RP},生殖器官磷累积量;R_P,生殖器官磷分配。同列数据不同字母表示差异显著(P<0.05),相同字母表示差异不显著(P>0.05)。下同。

Note: A_{SP}, P accumulation in shoot; A_{RP}, P accumulation in reproductive organs; R_P, P ratio of reproductive organs to shoots. Within the same column, different letters represent significant differences (P<0.05), while the same letters represent no significant differences (P>0.05). The same below.

殖器官磷分配变化不显著($P>0.05$)。由表 2 可见：与 N0 相比,施氮显著提高地上部和生殖器官的磷累积量($P<0.05$);不同施氮处理之间,地上部磷累积量盛蕾期以 U 与 UC 处理较高,盛花期以 UC 处理较高,吐絮期以 CRN 处理较高;棉花生殖器官的磷累积量盛蕾期、盛花期与地上部相似,吐絮期则以 UC 处理较高,吐絮期生殖器官磷分配以 U 与 UC 处理较高。

此外,2 年秸秆还田与不同氮肥配施对盛蕾期与盛花期地上部与生殖器官磷累积量互作显著($P<0.05$),盛花期地上部与生殖器官磷累积量均以 S1UC 处理组合较高,2 年均值分别为 32.3 与 9.2 kg/hm²;吐絮期 2021 表现显著($P<0.05$),2022 年不显著($P>0.05$)。

秸秆还田与不同氮肥配施对不同生育期生殖器官磷分配互作显著,吐絮期施氮下以 S1U 与 S1UC 处理组合生殖器官磷分配较高。

2.1.2 对大麦后直播棉钾累积及分配的影响

秸秆还田与不同氮肥配施对大麦后直播棉钾累积与分配的影响见表 3。可见,秸秆还田与不同氮肥配施对棉株地上部与生殖器官钾累积量的影响与对磷累积量的影响结果相似。秸秆还田下盛花期生殖器官钾分配无显著变化($P>0.05$)而吐絮期显著增加($P<0.05$);施氮处理间钾分配与磷分配也相似。秸秆还田与不同氮肥配施对盛蕾期与吐絮期地上部钾累积互作效应显著,吐絮期地上部钾累积量以 S1CRN 处理组合较高,2 年中测得的累

表 3 秸秆还田与不同氮肥配施对大麦后直播棉钾累积与分配的影响

Table 3 Effects of straw returning combined with different N fertilization on potassium uptake and distribution of field-seeded cotton after barley harvest

年份 Year	秸秆还田 模式 Straw returning pattern	氮肥 运筹 Nitrogen fertilizer strategy	$A_{SK}/(\text{kg}/\text{hm}^2)$			$A_{RK}/(\text{kg}/\text{hm}^2)$			$R_K/\%$		
			现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowerin g stage	吐絮期 Boll- opening stage	现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowerin g stage	吐絮期 Boll- opening stage	现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowerin g stage	吐絮期 Boll- opening stage
2021	S0	N0	19.8 e	60.6 d	119.2 f	1.4 d	12.8 d	63.4 c	7.1 a	21.2 a	53.3 b
		U	49.3 a	141.6 bc	215.0 e	2.6 a	21.5 c	87.7 b	5.4 c	15.2 d	40.8 de
		CRN	36.5 d	131.9 c	241.1 c	2.2 b	22.7 c	91.8 b	6.0 b	17.3 bcd	38.1 f
		UC	44.4 b	156.5 a	235.4 c	2.3 b	28.2 b	99.3 a	5.2 c	18.0 bc	42.2 d
	S1	N0	17.1 e	62.6 d	116.9 f	1.3 d	11.8 d	65.5 c	7.4 a	18.9 ab	56.0 a
		U	40.0 cd	144.3 b	225.0 d	2.2 bc	23.3 c	103.6 a	5.4 c	16.1 cd	46.1 c
		CRN	36.6 d	144.2 b	261.9 a	1.9 c	23.0 c	103.9 a	5.1 c	16.0 cd	39.7 ef
		UC	40.6 c	166.9 a	251.9 b	2.2 b	31.9 a	105.3 a	5.5 bc	19.1 ab	41.8 de
2022	S0	N0	14.8 c	74.2 e	112.7 e	0.4 d	14.5 d	61.8 e	3.0 ab	19.5 a	54.9 a
		U	24.9 a	152.1 d	210.8 d	0.9 a	19.3 c	90.8 d	3.4 a	12.7 e	43.1 bc
		CRN	18.9 b	160.7 cd	234.5 b	0.6 c	22.8 b	94.1 cd	3.3 ab	14.2 cd	40.1 d
		UC	24.6 a	165.9 bc	221.5 c	0.8 ab	25.3 a	94.1 cd	3.4 a	15.3 c	42.5 c
	S1	N0	12.8 c	71.8 e	119.2 e	0.4 e	12.9 e	64.5 e	2.8 b	18.0 b	54.1 a
		U	23.9 a	157.2 cd	221.3 c	0.8 b	22.2 b	99.2 bc	3.2 ab	14.1 d	44.8 b
		CRN	18.5 b	171.6 ab	242.2 a	0.4 de	23.2 b	102.7 ab	2.1 c	13.5 de	42.4 c
		UC	24.1 a	176.8 a	241.0 ab	0.8 ab	24.3 a	104.8 a	3.3 ab	13.8 cd	43.5 bc

注: A_{SK} ,地上部钾累积量; A_{RK} ,生殖器官钾累积量; R_K ,生殖器官钾分配。下同。

Note: A_{SK} , K accumulation in shoot; A_{RK} , K accumulation in reproductive organs; R_K , K ratio of reproductive organs to shoots. The same below.

积量分别为 261.9 与 242.2 kg/hm²。秸秆还田与不同氮肥配施对不同生育期生殖器官钾累积量互作效应显著,盛花期生殖器官钾累积量以 S1UC 处理组合较高,吐絮期以 S1UC 与 S1CRN 处理组合较高,吐絮期生殖器官钾累积量 2 年均值分别为 103.3 与 105.1 kg/hm²。秸秆还田与不同氮肥配施对生殖器官钾分配影响与磷相似。

2.1.3 对大麦后直播棉磷钾利用效率及皮棉产量的影响

秸秆还田与不同氮肥配施对磷钾利用效率及

皮棉产量的影响见表 4。秸秆还田对植株磷、钾利用效率无显著影响($P>0.05$)。不同氮肥配施显著影响磷、钾利用效率,与 U 处理相比,CRN 处理磷、钾利用效率显著降低,2021 年磷、钾利用率分别降低 3.6% 与 10.4%,2022 年磷、钾利用率分别降低 12.1% 与 11.1%;UC 处理 2021 年磷利用效率显著增加($P<0.05$),2022 年变化不显著($P>0.05$),2 年钾利用效率均变化不显著($P>0.05$)。秸秆还田与不同氮肥配施对植株磷、钾利用效率的影响互作效应不显著($P>0.05$)。

表 4 秸秆还田与不同氮肥配施对磷钾利用效率及皮棉产量的影响

Table 4 Effects of straw returning combined with different N fertilization on utilization efficiency of P and K and lint yield

秸秆还田模式 Straw returning pattern	氮肥运筹 Nitrogen fertilizer strategy	2021 年			2022 年		
		PUE	KUE	Y/(kg/hm ²)	PUE	KUE	Y/(kg/hm ²)
S0	N0	26.0 bc	10.1 a	1 206.7 d	21.7 c	8.5 a	958.4 d
	U	25.8 bc	6.8 b	1 466.1 c	25.1 ab	6.2 b	1 309.4 c
	CRN	25.0 bcd	6.1 c	1 483.2 bc	22.2 c	5.5 c	1 289.1 c
	UC	28.5 a	6.9 b	1 610.9 ab	24.9 ab	6.4 b	1 414.5 b
S1	N0	26.2 b	9.9 a	1 154.7 d	22.3 c	8.4 a	1 002.0 d
	U	24.4 cd	6.6 b	1 485.3 bc	26.1 a	6.4 b	1 443.7 b
	CRN	23.4 d	5.8 d	1 504.3 bc	22.8 bc	5.6 c	1 359.2 bc
	UC	26.6 b	6.7 b	1 679.3 a	26.2 a	6.4 b	1 534.4 a

注:PUE,磷利用效率;KUE,钾利用效率;Y,皮棉产量。下同。
Note: PUE, P utilization efficiency; KUE, K utilization efficiency; Y, lint yield. The same below.

与 S0 相比,2021 年处理 S1 皮棉产量无显著变化($P>0.05$),2022 年处理 S1 皮棉产量显著增加($P<0.05$)。施氮显著提高皮棉产量,两年均以 UC 处理最高。2021 年秸秆还田与不同氮肥配施对皮棉产量互作不显著($P>0.05$),2022 年秸秆还田与不同氮肥配施对皮棉产量的影响互作显著($P<0.05$),两年均以 S1UC 处理组合皮棉产量最高。

2.2 棉株磷钾累积及磷钾分配、利用及皮棉产量的关系

地上部磷、钾累积量与麦后直播棉生殖器官磷钾分配、利用效率及皮棉产量的相关分析见图 1。由图 1(a₁)可见地上部磷累积量与生殖器官磷分配

呈极显著正相关,表明地上部磷累积有利于提高在生殖器官中的分配。由图 1(a₂)可见地上部磷累积量与磷利用效率相关不显著。由图 1(a₃)可见,地上部磷累积量与皮棉产量呈极显著正相关,表明地上部磷累积有利于皮棉产量的形成。

由图 1(b₁)可见,地上部钾累积量与生殖器官钾分配呈极显著正相关关系,表明地上部钾累积有利于向生殖器官分配。由图 1(b₂)可见,地上部钾累积量与钾利用效率呈极显著负相关,表明过高的地上部钾累积量不利于提高钾利用效率。由图 1(b₃)可见,地上部钾累积量与皮棉产量呈极显著正相关关系,表明地上部钾累积有利于皮棉产量形成。

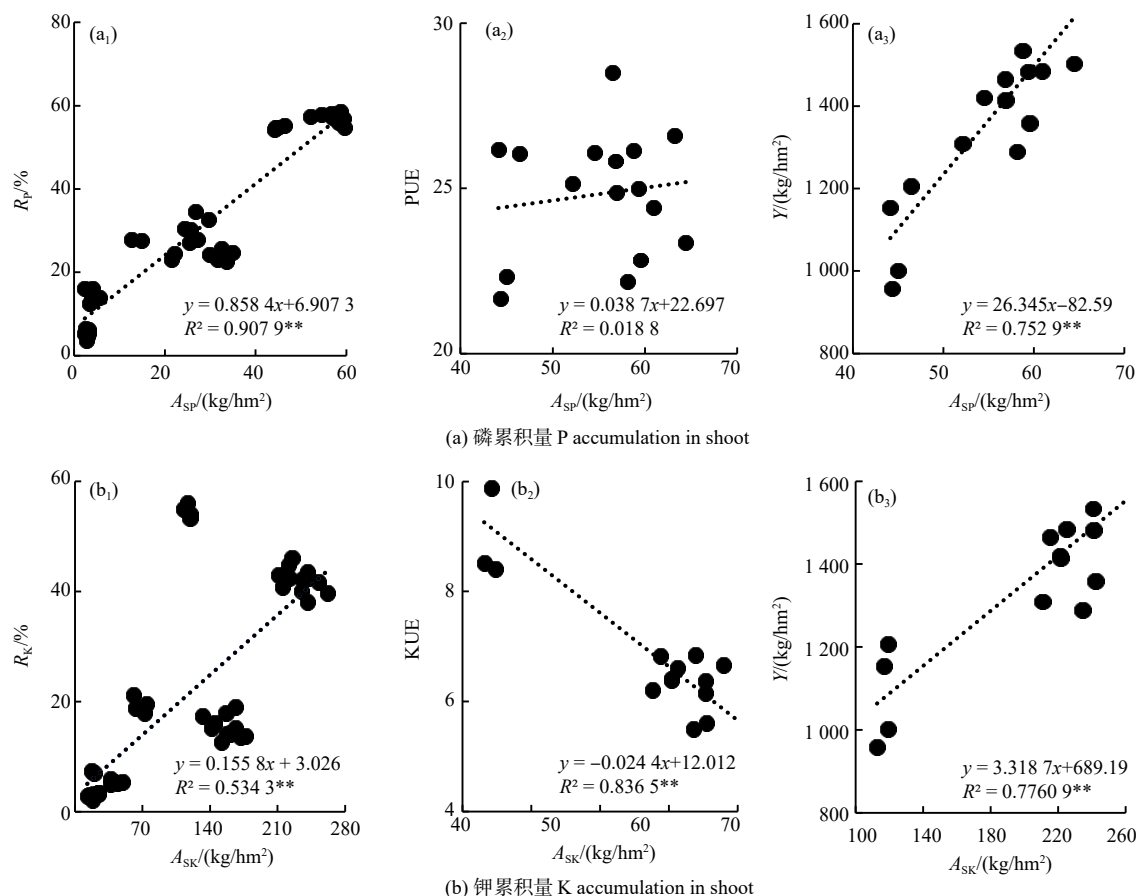


图 1 麦后直播棉地上部磷累积量(a)及钾累积量(b)与棉生殖器官磷钾分配、利用效率及皮棉产量的相关分析

Fig. 1 Correlation between the accumulations of P (a) and K (b) in shoot and the ratios of reproductive organs to shoot, utilization efficiency, and lint yield of direct-seeded cotton

2.3 秸秆还田与不同氮肥配施下土壤磷钾表观盈亏

秸秆还田与氮肥配施处理下土壤磷钾表观盈亏结果见表 5。可见处理 S0 土壤磷素均处于亏缺状态, 2 年土壤磷素亏缺均值分别达到 7.5 与 5.7 kg/hm², 处理 S1 土壤磷素 2021 年略有亏缺, 2022 年盈余, 表明较之于处理 S0, S1 土壤磷素亏缺有所改善。不同施氮处理间, 2021 年以 U 处理土壤磷素亏缺较低, 2022 年 U 处理土壤磷素盈余而 CRN 与 UC 处理均略有亏缺。2 年不同处理组合磷平衡系数为 0.8~1.1, 以 S1U 的平衡系数较高, 2 年分别为 1.0 与 1.1, 2 年 S1UC 的平衡系数均为 1.0, 表明 S1U 有潜在造成土壤磷素流失风险, 而 S1UC 土壤磷素基本平衡。

不同处理组合土壤钾素盈亏不同, 处理 S0 土壤钾素均处于亏缺状态, 处理 S1 不同施肥处理以 U 处理钾素盈余较高, 2 年分别为 27.5 与 29.5 kg/hm²; CRN 处理下土壤钾素 2021 年亏缺, 2022 年盈余; UC 处理 2 年土壤钾素均略有盈余。S1CRN 与

S1UC 处理组合 2 年平衡系数均为 1.0, 表明土壤钾素基本平衡, 降低了土壤钾素流失风险。

2.4 秸秆还田与不同氮肥配施下土壤速效磷及速效钾含量

秸秆还田与不同氮肥配施对土壤速效磷与速效钾含量的影响见表 6。可见: 与 S0 相比, 处理 S1 盛花期与吐絮期土壤速效磷、速效钾含量显著增加 ($P < 0.05$)。氮肥运筹显著影响土壤速效磷、速效钾含量 ($P < 0.05$), 施氮处理间, 盛蕾期土壤速效磷含量以 U 处理较高, 盛花期以 U 与 CRN 处理较高; 盛蕾与盛花期土壤速效钾含量均以 U 处理较高; 吐絮期土壤速效磷与速效钾含量均以 CRN 处理较高, 不同生育期土壤速效磷与速效钾含量均以 UC 处理较低。秸秆还田与不同氮肥配施对不同生育期土壤速效磷、速效钾含量影响交互显著 ($P < 0.05$), 总体上以 S1U 处理组合的速效磷与速效钾含量较高, 而 S0UC 与 S1UC 处理组合较低。

表5 不同处理土壤磷、钾素表观平衡
Table 5 Apparent P and K balance of soil under different treatments

年份 Year	处理组合 Treatment combination	养分投入量/(kg/hm ²) Nutrient input rate				地上部养分累 积量 Nutrient accumulation in shoot		盈余/ (kg/hm ²) Budget		平衡系数 Balance coefficient	
		秸秆 Straw		化肥 Chemical fertilizers		A _{SP} / (kg/ hm ²)	A _{SK} / (kg/ hm ²)	磷 Phos- phorus	钾 Pota- ssium	磷 Phos- phorus	钾 Pota- ssium
		磷 Phos- phorus	钾 Pota- ssium	磷 Phos- phorus	钾 Pota- ssium						
2021	S0U	0	0	50	150	56.8 c	215.0 e	-6.8 c	-65.0 d	0.9 ab	0.7 d
	S0CRN	0	0	50	150	59.3 b	241.1 c	-9.3 d	-91.1 e	0.8 b	0.6 e
	S0UC	0	0	50	150	56.5 c	235.4 c	-6.5 c	-85.4 e	0.9 b	0.6 e
	S1U	10.5	102.5	50	150	60.9 b	225.0 d	-0.4 a	27.5 a	1.0 a	1.1 a
	S1CRN	10.5	102.5	50	150	64.4 a	261.9 a	-3.9 b	-9.4 c	0.9 b	1.0 c
	S1UC	10.5	102.5	50	150	63.2 a	251.9 b	-2.7 b	0.6 b	1.0 ab	1.0 b
2022	S0U	0	0	50	150	52.1 d	210.8 c	-2.1 c	-60.8 c	1.0 ab	0.7 c
	S0CRN	0	0	50	150	58.1 ab	234.5 a	-8.1d	-84.5 e	0.9 c	0.6 d
	S0UC	0	0	50	150	56.9 bc	221.5 b	-6.9 d	-71.5 d	0.9 c	0.7 c
	S1U	10.9	100.8	50	150	54.5 cd	221.3 b	6.4 a	29.5 a	1.1 a	1.1 a
	S1CRN	10.9	100.8	50	150	59.5 a	242.2 a	1.4 b	8.6 b	1.0 b	1.0 b
	S1UC	10.9	100.8	50	150	58.7 ab	241.0 a	2.2 b	9.8 b	1.0 ab	1.0 b

表6 秸秆还田与不同氮肥配施对土壤速效磷与速效钾含量的影响
Table 6 Effects of straw returning combined with different N fertilization
on the soil available P and K content

土壤养分 Soil nutrient	秸秆还田模式 Straw returning pattern	氮肥运筹 Nitrogen fertilizer strategy	2021年			2022年		
			现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	吐絮期 Boll-opening stage	现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	吐絮期 Boll-opening stage
			mg/kg			mg/kg		
速效磷 Available P	S0	N0	58.7 b	59.5 b	60.1 bc	58.1 b	52.1 c	58.5 bc
		U	58.9 b	58.1 b	57.0 c	62.8 ab	62.0 b	56.3 c
		CRN	50.1 c	51.6 c	60.1 bc	51.4 cd	53.3 c	57.0 c
		UC	41.9 d	45.9 d	45.9 d	46.5 d	46.5 d	44.7 d
	S1	N0	64.2 a	64.9 a	64.0 a	62.7 ab	51.9 c	61.0 ab
		U	60.3 b	64.6 a	61.8 ab	65.1 a	65.2 ab	62.8 a
		CRN	52.8 c	67.6 a	63.0 ab	52.0 c	67.1 a	59.0 bc
		UC	41.0 d	48.8 cd	46.2 d	46.9 d	46.9 d	44.6 d
速效钾 Available k	S0	N0	284.3 c	251.0 d	289.7 e	289.8 d	264.2 d	292.7 c
		U	314.5 ab	290.7 b	302.5 d	305.5 cd	272.0 d	302.0 c
		CRN	300.0 bc	273.1 c	330.1 ab	317.7 bc	255.5 e	321.5 b
		UC	295.7 bc	236.8 d	305.1 d	294.5 d	239.2 f	292.1 c
	S1	N0	322.9 a	292.5 b	315.9 c	300.6 d	292.4 bc	323.4 ab
		U	335.6 a	310.3 a	321.7 bc	336.7 a	310.1 a	326.5 ab
		CRN	300.5 bc	291.2 b	338.9 a	327.0 ab	296.5 b	337.3 a
		UC	289.6 c	274.1 c	301.7 d	300.8 d	284.5 c	301.7 c

3 讨 论

3.1 秸秆还田耦合“尿素+控释氮肥”促进对直播棉养分累积及利用的影响

磷和钾是作物生长发育所需的重要营养元素^[22]。卢合全等^[23]研究表明,秸秆还田下棉株始絮期间磷累积量逐年增加而钾累积量无显著变化;张凡等^[24]研究指出,麦秸秆全量还田显著提高棉花不同生育期的磷、钾累积量。本研究发现秸秆还田下盛蕾期地上部磷、钾累积量呈降低变化、盛花期后磷、钾累积量显著增加。与前述研究结果有差异,与试验条件及种植方式不同有关。分析秸秆还田下棉株磷钾累积变化的原因,秸秆还田初期,微生物争氮^[6,25]、秸秆酚酸的“抑制效应”^[4]影响棉苗对土壤氮素吸收,影响生物量建成,是盛蕾期地上部磷钾累积量低的原因;随着秸秆养分释放,棉株生理代谢加强^[10],提高了盛花后磷钾累积。研究还发现,秸秆还田未显著提高棉株磷、钾利用效率,与秸秆还田下养分释放慢、影响养分转化有关,这也是生产中秸秆还田下易造成晚熟的原因^[4,6]。因此,直播棉秸秆还田初期需要补施速效氮肥以减缓微生物争氮及酚酸的“抑制效应”,促进棉苗生长转化。

施氮影响作物生长并决定磷、钾累积量。黄巧义等^[26]研究指出缓释氮肥处理水稻地上部磷、钾累积量与常规施肥并无显著差异,张木等^[27]研究也指出,缓释尿素对水稻磷的吸收有显著的协同作用。本试验条件下,与尿素处理相比,“尿素+控释氮肥”处理提高了盛花期后的磷钾累积量,控释氮肥处理提高吐絮期的磷钾累积量。与前述结果不太一致,分析认为与试验条件及处理差异等有关。分析不同氮肥运筹对棉株磷钾累积差异原因,与尿素养分释放较快但效应期短、而控释氮肥养分释放慢但效应期长有关。“尿素+控释氮肥”处理保证了全生育期氮素供应,氮肥充足一方面为土壤提供足够的养分“源”,另一方面也促进对磷钾吸收^[28-29]。是本试验条件下地上部磷钾累积量高的基础。研究还表明,地上部磷、钾累积量与产量呈极显著正相关。控释氮肥处理盛蕾期磷、钾累积量低,不利于生长转化;吐絮期地上部磷、钾累积量高,但生殖器官磷钾分配较低,生产上表现为后期晚熟,产量不及“尿素+控释氮肥”处理,植株磷、钾利用率较低。“尿素+控释氮肥”处理不同生育期地上部磷钾累

积量均较高,植株磷、钾的利用效率也较高,利于产量形成。

本试验中秸秆还田耦合“尿素+控释氮肥”,前期有利于棉苗快速发苗,中后期秸秆与控释氮肥养分释放促成对棉株氮素的持续供给^[6],磷钾累积量及利用率均较高,2年皮棉产量也较高。

3.2 秸秆还田耦合“尿素+控释氮肥”有利于土壤磷钾表观平衡

农田养分管理除了要考虑产量、肥料利用效率、土壤供养能力等因素外,农田养分平衡状况也应作为肥料合理运筹的重要依据^[9],农田养分盈余量则反映了土壤养分的变化方向^[16]。盐碱地土壤磷缺乏^[17],本试验条件下,秸秆不还田土壤磷素亏缺,2022年秸秆还田下土壤磷素表观盈余,表明秸秆持续还田有利于缓解盐碱地磷缺乏、氮磷钾养分不平衡问题。鉴于秸秆持续还田磷释放及磷的当季利用率低^[30-31],可以提高土壤供磷潜力,肥料磷素积累增加流失风险^[16,32],持续秸秆还田下应适当减少磷肥的施用量。本研究中秸秆不还田处理土壤钾素亏缺,秸秆还田下钾素亏缺较低,与秸秆钾素含量大且释放快,容易被作物吸收利用^[14]有关。研究还发现,秸秆还田配施控释氮肥及“尿素+控释氮肥”土壤钾素表观平衡。已有研究认为盐碱地土壤钾素富余^[17],但土壤盐分会抑制作物对钾的吸收与利用^[17,33]。今后研究中要关注土壤钾素管理及其高效利用的问题。

3.3 秸秆还田耦合“尿素+控释氮肥”促进棉株对土壤速效磷与速效钾的利用

大量研究认为秸秆还田提高土壤速效磷、速效钾含量^[12-15],本试验中秸秆还田下盛花期后土壤速效磷与速效钾含量提高,与已有研究结果基本一致^[12]。不同氮肥配施也显著影响土壤速效磷与速效钾含量,本试验中,无论秸秆是否还田,不同生育期以“尿素+控释氮肥”处理的土壤速效磷、速效钾含量较低,可能与地上部养分累积量、利用率均较高有关,也表明“尿素+控释氮肥”运筹方式减轻了土壤养分流失的风险^[6,31]。因此,秸秆还田下,“尿素+控释氮肥”运筹是促进作物对土壤速效磷、速效钾的有效利用。

4 结 论

为盐碱地麦棉轮作制定科学减肥增效的策略

提供依据,采用秸秆还田耦合不同氮肥,探究不同处理组合对大麦后直播棉磷钾累积与利用、土壤磷钾平衡及土壤速效磷钾含量影响。主要结论如下:

1)秸秆还田耦合“尿素+控释氮肥”有利于棉株磷钾累积及利用,2年吐絮期地上部磷、钾累积量均值较秸秆还田配施尿素分别提高5.7%与10.4%;2年磷、钾利用率均值比秸秆还田配施控释氮肥分别提高14.3%与14.9%,2年皮棉产量达到1500 kg/hm²以上,是高产、磷钾利用高效的施肥策略;

2)秸秆还田耦合“尿素+控释氮肥”土壤磷素与钾素基本平衡,进一步可继续优化磷、钾肥高效利用的施肥策略;

3)秸秆还田耦合“尿素+控释氮肥”促进对土壤速效磷与速效钾的利用,减轻了土壤肥料的环境风险。

参考文献 References

- [1] 杨长琴, 张国伟, 刘瑞显, 倪万潮, 张雷, 周关印. 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
Yang C Q, Zhang G W, Liu R X, Ni W C, Zhang L, Zhou G Y. Effect of nitrogen management on lint yield and nitrogen utilization of field-seeded cotton after barley harvest[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1607-1613 (in Chinese)
- [2] 刘瑞显, 周治国, 陈德华, 张志刚, 郑曙峰, 杨长琴, 张国伟. 长江流域棉区棉花“三集中”的轻简高效理论与栽培途径[J]. 中国棉花, 2018, 45(9): 11-12, 17
Liu R X, Zhou Z G, Chen D H, Zhang Z G, Zheng S F, Yang C Q, Zhang G W. Theory of “sanjizhong” and technology on simple and efficient cotton cultivation in the Yangtze River valley[J]. *China Cotton*, 2018, 45(9): 11-12, 17 (in Chinese)
- [3] Yang C Q, Wang X J, Li J N, Zhang G W, Shu H M, Hu W, Han H Y, Liu R X, Guo Z C. Straw return increases crop production by improving soil organic carbon sequestration and soil aggregation in a long-term wheat-cotton cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(2): 669-679
- [4] 李佳男, 杨长琴, 束红梅, 张国伟, 王晓婧, 刘瑞显, 陈嘉敏, 王飞兵, 陈新红. 小麦秸秆还田后茬棉田土壤NO₃⁻-N和酚酸变化对棉苗根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(6): 868-876
Li J N, Yang C Q, Shu H M, Zhang G W, Wang X J, Liu R X, Chen J M, Wang F B, Chen X H. Effects of content dynamics of NO₃⁻-N and phenolic acids in soil on root growth of cotton seedlings under the return of wheat straw[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(6): 868-876 (in Chinese)
- [5] 张国娟, 濮晓珍, 张鹏鹏, 张旺锋. 干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2624-2634
Zhang G J, Pu X Z, Zhang P P, Zhang W F. Effects of stubble returning to soil and fertilization on soil nitrogen availability and root biomass of cotton in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2624-2634 (in Chinese)
- [6] Yang C Q, Li J N, Zhang G W, Shu H M, Wang X J, Hu W, Liu R X. Barley straw combined with urea and controlled-release nitrogen fertilizer improves lint yield and nitrogen utilization of field-seeded cotton[J]. *Agronomy*, 2022, 12(5): 1208
- [7] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 张木, 黄旭, 连玉万, 李苹, 付弘婷. 控释尿素与常规尿素配施比例对甜玉米产量和氮肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 622-631
Huang Q Y, Tang S H, Zhang F B, Zhang M, Huang X, Pang Y W, Li P, Fu H T. Effect of the blending ratio of controlled-release urea and conventional urea on yield and nitrogen utilization efficiency of sweet corn[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 622-631 (in Chinese)
- [8] 王昆昆, 廖世鹏, 任涛, 李小坤, 丛日环, 鲁剑巍. 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 94-104
Wang K K, Liao S P, Ren T, Li X K, Cong R H, Lu J W. Effect of continuous straw returning on soil phosphorus availability and crop phosphorus utilization efficiency of oilseed rape-rice rotation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(1): 94-104 (in Chinese)
- [9] 侯云鹏, 刘志全, 尹彩侠, 孔丽丽, 李前, 张磊, 王立春, 徐新朋. 长期秸秆还田下基于东北水稻高产和钾素平衡的钾肥用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2020-2031
Hou Y P, Liu Z Q, Yin C X, Kong L L, Li Q, Zhang L, Wang L C, Xu X P. Optimum amount of potassium fertilizer based on high yield and soil potassium balance under straw return in rice production region of Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(11): 2020-2031 (in Chinese)
- [10] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 丛日环, 李小坤, 周鹏, 杨文兵, 戴志刚. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 292-302
Li J F, Lu J W, Ren T, Cong R H, Li X K, Zhou L, Yang W B, Dai Z G. Effect of straw incorporation substitute for K-fertilizer under different paddy soil K supply capacities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 292-302 (in Chinese)
- [11] Yang G Z, Zhou X B, Li C F, Nie Y C, Zhang X L. Cotton stubble mulching helps in the yield improvement of subsequent winter canola (*Brassica napus* L.) crop[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 50: 190-196
- [12] 郭振威, 李永山, 陈梦妮, 范巧兰, 王慧. 长期秸秆还田和施用有机肥对连作棉田土壤化学性质及微生物数量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 177-186
Guo Z W, Li Y S, Chen M N, Fan Q L, Wang H. Effects of long-term straw returning and organic fertilizer application on the soil chemical properties and microbial quantity of continuous cropping cotton field[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(11): 177-186 (in Chinese)
- [13] 徐洁章, 韩科峰, 吴良欢. 长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 23-32
Xu J Z, Han K F, Wu L H. Effects of exogenous organic materials on the yield of double cropping rice, soil fertility and soil quality[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 23-32 (in Chinese)
- [14] Akhtar K, Wang W Y, Khan A, Ren G X, Zaheer S, Sial T A, Feng Y Z, Yang G H. Straw mulching with fertilizer nitrogen: An approach for improving crop yield, soil nutrients and enzyme activities[J]. *Soil Use and Management*, 2019, 35(3): 526-535

- [15] Sui N, Zhou Z G, Yu C R, Liu R X, Yang C Q, Zhang F, Song G L, Meng Y L. Yield and potassium use efficiency of cotton with wheat straw incorporation and potassium fertilization on soils with various conditions in the wheat-cotton rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2015, 172: 132-144
- [16] 王明, 逢蕾, 马明生, 郑浩飞, 杨楠, 苟磊刚, 胡南南, 肖歆玥, 王小燕, 邵泽和, 杨岩斌, 杨锦. 不同覆盖方式对马铃薯-小麦轮作土壤养分表现平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(2): 292-304
- Wang M, Pang L, Ma M S, Zheng H F, Yang N, Gou L G, Hu N N, Xiao X Y, Wang X Y, Shao Z H, Yang Y B, Yang J. Effects of mulching methods on soil nutrient apparent balance under wheat-potato rotation system in the rain-fed area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(2): 292-304 (in Chinese)
- [17] 杨长琴, 刘瑞显, 张国伟, 王晓婧, 倪万潮. 江苏滨海盐碱地麦后直播棉氮、磷、钾肥料优化配比研究[J]. *棉花学报*, 2020, 32(1): 11-20
- Yang C Q, Liu R X, Zhang G W, Wang X J, Ni W C. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on field-seeded cotton after barley harvest grown in coastal saline fields in Jiangsu[J]. *Cotton Science*, 2020, 32(1): 11-20 (in Chinese)
- [18] 杨长琴, 张国伟, 刘瑞显, 王晓婧, 倪万潮. 播期对麦(油)后直播棉产量、品质及氮磷钾利用的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(1): 42-49
- Yang C Q, Zhang G W, Liu R X, Wang X J, Ni W C. Effects of sowing dates on lint yield, fiber quality, and use of nitrogen, phosphorus and potassium in cotton field-seeded after barley or oilseed rape harvest in Yangtze River Valley, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 42-49 (in Chinese)
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [20] Zheng Y H, Wang Z L, Sun X Z, Jia A J, Jiang G M, Li Z J. Higher salinity tolerance cultivars of winter wheat relieved senescence at reproductive stage [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(2): 129-138
- [21] 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)
- [22] 张晨曦, 田明慧, 杨硕, 杜嘉琪, 何堂庆, 仇云鹏, 张学林. 酸性土壤中丛枝菌根真菌菌剂多样性对玉米产量及其磷钾吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(15): 2899-2910
- Zhang C X, Tian M H, Yang S, Du J Q, He T Q, Qiu Y P, Zhang X L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculant diversity on yield, phosphorus and potassium uptake of maize in acidic soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(15): 2899-2910 (in Chinese)
- [23] 卢合全, 唐薇, 张冬梅, 罗振, 孔祥强, 李振怀, 徐士振, 代建龙, 李维江, 辛承松. 化肥减施和秸秆还田对土壤肥力、棉花养分吸收利用及产量的影响[J]. *棉花学报*, 2022, 34(2): 137-150
- Lu H Q, Tang W, Zhang D M, Luo Z, Kong X Q, Li Z H, Xu S Z, Dai J L, Li W J, Xin C S. Effects of chemical fertilizer reduction and stalk returning on soil nutrients content, nutrient absorption and yield of cotton [J]. *Cotton Science*, 2022, 34(2): 137-150 (in Chinese)
- [24] 张凡, 睢宁, 余超然, 刘瑞显, 杨长琴, 宋光雷, 孟亚利, 周治国. 小麦秸秆还田和施钾对棉花产量与养分吸收的效应[J]. *作物学报*, 2014, 40(12): 2169-2175
- Zhang F, Sui N, Yu C R, Liu R X, Yang C Q, Song G L, Meng Y L, Zhou Z G. Effects of wheat straw returning and potassium fertilizer application on yield and nutrients uptake of cotton[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(12): 2169-2175 (in Chinese)
- [25] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 欧阳竹. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(12): 1633-1642
- Li T, He C E, Ge X Y, Ouyang Z. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1633-1642 (in Chinese)
- [26] 黄巧义, 张木, 黄旭, 唐拴虎, 张发宝, 逢玉万, 易琼, 李苹, 付弘婷. 聚脲甲醛缓释氮肥一次性基施在双季稻上的应用效果[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3996-4006
- Huang Q Y, Zhang M, Huang X, Tang S H, Zhang F B, Pang Y W, Yi Q, Li P, Fu H T. Effect of one-off application of poly urea-formaldehyde fertilizer under reduced N rate on double cropping rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3996-4006 (in Chinese)
- [27] 张木, 唐拴虎, 张发宝, 黄巧义, 黄旭. 60天释放期缓释尿素可实现早稻和晚稻的一次性基施[J]. *植物营养科学学报*, 2017, 23(1): 119-127
- Zhang M, Tang S H, Zhang F B, Huang Q Y, Huang X. Slow-release urea of 60-day-release period is suitable for one basal application in early and late rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 119-127 (in Chinese)
- [28] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 李晓, 王朝辉. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 853-863
- Huang T M, Zheng X F, Hou Y Y, Li X, Wang Z H. Yield and N, P and K uptake and utilization of winter wheat affected by straw return to soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 853-863 (in Chinese)
- [29] 田明慧, 杨硕, 杜嘉琪, 张晨曦, 何堂庆, 张学林. 不同氮肥水平下丛枝菌根真菌对玉米籽粒灌浆期磷和钾吸收的影响[J]. *作物学报*, 2022, 48(12): 3166-3178
- Tian M H, Yang S, Du J Q, Zhang C X, He T Q, Zhang X L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on phosphorus and potassium absorption at grain filling stage under different nitrogen fertilizer input in maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(12): 3166-3178 (in Chinese)
- [30] Khan A, Lu G Y, Ayaz M, Zhang H T, Wang R J, Lv F L, Yang X Y, Sun B H, Zhang S L. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 256: 1-11
- [31] 马清霞, 王朝辉, 惠晓丽, 张翔, 张悦悦, 侯赛宾, 黄宁, 罗来超, 张世君, 党海燕. 基于产量和养分含量的旱地小麦施磷量和土壤有效磷优化[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(1): 73-85
- Ma Q X, Wang Z H, Hui X L, Zhang X, Zhang Y Y, Hou S B, Huang N, Luo L C, Zhang S J, Dang H Y. Optimization of phosphorus rate and soil available phosphorus based on grain yield and nutrient contents in dryland wheat production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(1): 73-85 (in Chinese)
- [32] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207-4229
- Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207-4229 (in Chinese)
- [33] 邹芳刚, 郭文琦, 王友华, 赵文青, 周治国. 施氮量对长江流域滨海盐土棉

花氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1150-1158
Zou F G, Guo W Q, Wang Y H, Zhao W Q, Zhou Z G. Effects of nitrogen
application rate on the nitrogen uptake and utilization of cotton grown in

coastal saline fields of Yangtze River Valley[J]. *Journal of Plant Nutrition
and Fertilizer*, 2015, 21(5): 1150-1158 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 杨长琴, 博士, 江苏省农业科学院经济作物研究所副研究员。主要从事棉花轻简高效栽培技术与生理研究及科技服务工作。主持国家重点研发计划子课题、江苏省自主创新等项目, 以第一作者发表文章 30 余篇, SCI 论文 3 篇, 江苏省地方标准 1 个, 参编著作 2 部, 获得神农中华农业科技奖一等奖, 排名第 5。



通讯作者简介: 刘瑞显, 博士, 江苏省农业科学院经济作物研究所研究员, 经济作物栽培与生理调控团队首席专家, 南京农业大学、江苏大学、淮阴工学院硕士生导师。主持国家自然科学基金面上、国家重点研发计划子课题等项目 10 多项, 以第一及通讯作者发表学术论文 30 余篇, 其中 SCI 论文 8 篇, 参编著作 2 部, 授权国家发明专利 7 个, 江苏省地方标准 2 个, 参与获得农业农村部神农中华农业科技奖一等奖。