

施氮对中国棉田产量和水分利用效率影响的 Meta 分析

蔡焕杰^{1,2} 李府阳^{1,2} 赵政鑫^{1,2} 张学桂^{1,2} 刘轩昂^{1,2} 王茂东^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区农业节水研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为系统分析不同气候条件、土壤基础条件和农田管理措施条件下施氮对棉花产量和水分利用效率的影响,收集了国内外已发表的 103 篇中英文文献,筛选其中 37 篇文献,共获得 301 组产量和 127 组水分利用效率数据。基于 Meta 分析方法定量分析了不同生产条件下施氮对棉花产量和水分利用效率的影响,同时利用偏相关分析找出施氮条件下棉花产量和水分利用效率的主要影响因素。结果表明,以不施氮为对照,施氮能够显著提高棉花的产量和水分利用率。在年均降水量 200 ~ 500 mm 的地区施氮对产量和水分利用率的提高作用最为明显,效应量分别为 34.02% 和 54.15%;施氮对产量和水分利用率的提高作用均随着日照时数的增大而增大。当土壤 pH 值为 6 ~ 8 时,施氮对棉花产量和水分利用效率的提高作用最为明显,效应量分别为 28.52% 和 24.59%;在不同土壤质地中施氮对产量和水分利用效率的提高作用均表现为在砂土中效应量最大,分别为 46.71% 和 26.29%;随着施肥频次的增加,施氮对棉花产量和水分利用率的提高作用逐渐增大;施氮对产量的提高作用随灌水量的增加而增加,对水分利用率的提高作用随灌水量的增加呈先增加后降低趋势。当施氮量为 300 ~ 450 kg/hm² 时,施氮对产量和水分利用效率的提高作用最为明显;当种植密度为 1.5 × 10⁵ ~ 2.5 × 10⁵ 株/hm² 时,施氮对产量和水分利用效率的促进作用最为明显,效应量分别为 38.48% 和 16.46%。施氮量和土壤 pH 值是施氮条件下棉花产量的主要影响因子;施氮量和灌水量是施氮条件下棉花水分利用效率的主要影响因子。本研究结果可为不同生产条件下棉花实现高产高效提供参考。

关键词: 棉花; 产量; 水分利用效率; 施氮; Meta 分析

中图分类号: S513; S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)12-0316-11

OSID:



Meta-analysis of Effects of Nitrogen Application on Cotton Yield and Water Use Efficiency in China

CAI Huanjie^{1,2} LI Fuyang^{1,2} ZHAO Zhengxin^{1,2} ZHANG Xuegui^{1,2} LIU Xuanang^{1,2} WANG Maodong^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To systematically analyze the effects of nitrogen application on cotton yield and water use efficiency under different climatic conditions, soil foundation conditions, and farmland management measures, totally 103 published Chinese and English literatures from China were collected, among which 37 papers were selected, and a total of 301 sets of yield and 127 sets of water use efficiency data were obtained. Based on the Meta-analysis method, the impact of nitrogen application on cotton yield and water use efficiency under different production conditions was quantitatively analyzed, and partial correlation analysis was used to identify the main influencing factors of cotton yield and water use efficiency under nitrogen application conditions. The results showed that with no nitrogen application as the control, nitrogen application can significantly improve the yield and water use efficiency of cotton. The effect of nitrogen application on yield and water use efficiency was most significant in areas with an average annual precipitation of 200 ~ 500 mm, with effects of 34.02% and 54.15%, respectively. The effect of nitrogen application on yield and water use efficiency was increased with the increase of sunshine hours. When the soil pH value was 6 ~ 8, nitrogen application had the most significant effect on

improving cotton yield and water use efficiency, with the effective amounts being 28.52% and 24.59%, respectively. The effect of nitrogen application on yield and water use efficiency in different soil textures was the highest in sandy soil, with 46.71% and 26.29%, respectively. As the frequency of fertilization was increased, the effect of nitrogen application on cotton yield and water use efficiency was gradually increased. The effect of nitrogen application on yield was increased with the increase of irrigation amount, and the effect on water use efficiency showed a trend of first increase and then decrease with the increase of irrigation amount. When the nitrogen application rate was 300 ~ 450 kg/hm², nitrogen application had the most significant effect on improving yield and water use efficiency. When the planting density was 1.5 × 10⁵ ~ 2.5 × 10⁵ plants/hm², nitrogen application had the most significant promoting effect on yield and water use efficiency, with effective amounts of 38.48% and 16.46%, respectively. The nitrogen application rate and soil pH value were the main influencing factors on cotton yield under nitrogen application conditions. The nitrogen application rate and irrigation amount were the main influencing factors of cotton water use efficiency under nitrogen application conditions. The research results can provide reference for achieving high yield and efficiency in cotton cultivation under different production conditions.

Key words: cotton; yield; water use efficiency; nitrogen application; Meta-analysis

0 引言

施肥是农业生产中最快速最有效的增产方式之一,对作物的生长发育、产量提高起着至关重要的作用,其中氮肥对作物生长发育影响非常显著,氮肥对产量提高的贡献率可达 30% 以上^[1]。目前我国化肥施用量较大,但利用效率偏低。农户为了实现作物高产往往超量施加氮肥,过量施氮会加剧温室气体排放、引起土壤板结等问题^[2]。我国是世界上人均水资源占有量严重不足的国家,水资源短缺和分布不均严重制约着我国农业生产的可持续发展^[3]。我国农业灌溉用水量占全国总用水的 60% 以上。诸多研究结果表明,农业生产中水氮之间存在着明显的交互作用。水分不足或过多均会制约氮肥作用的充分发挥,而氮肥对水分的吸收与利用也存在明显的调控作用^[4]。适宜的水氮供应可以促进作物的光合作用^[5],增加作物干物质积累量,并最终对产量和品质的提高起到积极的作用^[6],同时还可以提高水氮利用效率^[7]。

棉花是我国的重要经济作物,近年来产量连年不断增长,2022 年全国棉花总产量 5.977 × 10⁶ t,比 2021 年增加 4.3%^[8]。前人在不同试验条件下探究了施氮对棉花产量和水分利用效率的影响,但研究结果有所不同,尔晨等^[9]在年均降水量 46 mm 的塔里木盆地西北部、土壤 pH 值为 8.2 的砂壤土质条件下研究表明,施氮可提高棉花产量 11.6% ~ 12.4%,提高水分利用效率 11.4% ~ 11.5%。李越鹏等^[10]在年平均气温为 10.9℃ 的库尔勒市进行田间试验研究认为,不同种植密度、灌水条件下施氮可提高产量 6.34% ~ 12.32%,提高水分利用效率

2.17% ~ 19.49%。伍维模等^[11]在南疆相应自然条件下试验认为施加一定量氮肥会提高棉花的净光合速率进而提高产量和水氮利用效率。司转运等^[3]在年均日照时数 2 399 h 的黄淮海中部壤土中进行试验,认为施氮可以提高产量 20.83% ~ 51.55% 和水分利用效率 25.00% ~ 50.00%。已有的田间试验结果均为在某一特定生产条件下得到的结论,无法具体量化不同生产条件下施氮对棉花产量和水分利用效率的影响。

Meta 分析是对同一主题下的多个研究结果进行综合分析的方法,通过效应量将各研究进行整合量化,进而系统分析特定措施的综合效应及影响因素^[12]。基于此,本研究基于检索到的 2023 年 2 月前施氮对中国棉田产量和水分利用效率影响的研究数据,运用 Meta 分析方法以不施氮肥为对照,定量总结不同生产条件下施氮对棉花产量和水分利用效率的影响,为棉田合理施氮、提高产量和水分利用效率及减少资源浪费提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据获取与筛选

采用 Meta 分析方法研究不同生产条件下施氮对作物产量和水分利用效率的影响。以“棉花”、“氮素”、“产量”、“水氮利用”、“cotton”、“yield”、“nitrogen levels”、“water use efficiency”和“China”等为关键词从中国知网、万方、Web of Science 和 Science-hub 等中英文数据库检索 2023 年 2 月前发表的施氮对我国棉花产量和水氮利用效率影响的文献,并进行筛选。筛选标准为:①研究地区为中国,试验具体操作步骤清晰,如时间、地点、管理措施等。②试验处理至少包括 1 组不施氮肥和施氮肥的

处理且其他田间试验条件一致。③文中提供了棉花产量、耗水量或水分利用效率等数据且样本量及标准偏差可获得。基于以上筛选标准,收集了来自全国已发表的 103 篇中英文文献,在其中筛选了 37 篇文献,包括我国棉花主产区新疆棉区 18 篇、黄河流域棉区 13 篇和长江流域棉区 6 篇,共获得 301 组产量和 127 组水分利用效率数据。筛选所得文献试验时间分布如表 1 所示。

表 1 筛选所得文献试验时间分布

Tab.1 Time distribution of literature screening

发表年份	experiments				篇
	2005— 2010 年	2010— 2015 年	2015— 2020 年	2020 年 至今	
文献数量	4	6	10	17	

1.2 数据分类

将收集的数据进行分类统计(表 2),主要统计

表 2 数据分类

Tab.2 Data classification

气候因素			土壤条件			农田管理措施			
年均降水量/ mm	年均温/ ℃	年均日照 时数/h	pH 值	土壤类型	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	施肥频次/ 次	灌水量/ mm	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	种植密度/ (株·hm ⁻²)
0 ~ 200	≤10	0 ~ 2 600	0 ~ 6	砂质土	0 ~ 10	0 ~ 5	0 ~ 250	0 ~ 150	0 ~ 1.5 × 10 ⁵
200 ~ 500	10 ~ 15	> 2 600	6 ~ 8	沙壤土	> 10	> 5	250 ~ 500	150 ~ 300	1.5 × 10 ⁵ ~ 2.5 × 10 ⁵
500 ~ 800	> 15		> 8	壤土			> 500	300 ~ 450	> 2.5 × 10 ⁵
				粘土				> 450	

因素包括:气象条件(年均温、年均降水量、年日照时数等)、土壤条件(土壤类型、pH 值、有机质含量(质量比)等)以及农田管理措施(施氮量、灌水量、施肥频次等)。

1.3 数据分析

利用各生产条件中,施氮(试验组)和不施氮(对照组)的产量、水分利用效率、标准差、重复数来计算效应值。在 Meta 分析时,试验组与对照组数据的比值为反应比,并用自然对数变换形式来表示效应量,计算式为

$$\ln R = \ln \frac{x_e}{x_c} \tag{1}$$

式中 R ——反应比

x_e ——施氮条件下产量或水分利用效率

x_c ——不施氮条件下产量或水分利用效率

为直观表达施氮对产量或水分利用效率的促进或抑制,将反应比转换为百分比(%)的形式来表征效应量,计算式为

$$I = (R - 1) \times 100\% \tag{2}$$

若 I 的 95% 置信区间均大于 0,表示施氮会显著提高产量或水分利用效率;若 I 的 95% 置信区间包含 0,表示施氮对产量或水分利用效率无显著影响;若 I 的 95% 置信区间均小于 0,表示施氮会显著降低产量或水分利用效率^[12]。

为检验所收集文献的偏倚性,采用漏斗图与 Rosenthal 安全系数对偏倚性进行量化,若 $N > 5n + 10$ (N 为安全系数, n 为样本量)且漏斗图对称性良好则认为研究不存在发表偏倚^[13]。

1.4 数据处理

运用 Excel 2016 软件进行数据收集和分类,采

用 Metawin 2.1 软件进行偏倚性检验和效应量计算,使用 Origin 2022 绘制作图,使用 SPSS 22.0 进行偏相关分析。

2 结果与分析

2.1 综合效应量和偏倚性检验

搜集数据的综合效应量及偏倚性检验结果如表 3 所示,漏斗图如图 1 所示。施氮对产量影响的综合效应量为 24.59%,95% 置信区间为 22.27% ~ 26.92%,对水分利用效率影响的综合效应量为 14.87%,95% 置信区间为 13.06% ~ 16.68%。这表明在全国范围内,施加氮肥可以显著提高棉田产量和水分利用效率。所收集的产量和水分利用效率数据偏倚性检验的 Rosenthal 安全系数分别为 892 868 和 33 989,远大于 $5n + 10$,漏斗图对称性良好,这表明所搜集的文献不存在发表偏倚性。

表 3 综合效应量和偏倚性检验

Tab.3 Comprehensive effect size and value of bias test

参数	平均 效应量	95% 置信区间/%		n	N
		区间下限	区间上限		
产量	24.59	22.27	26.92	301	892 868
水分利用效率	14.87	13.06	16.68	127	33 989

2.2 不同气候条件下施氮对棉花产量和水分利用效率的影响

在不同年均降水量、年均温和年日照时数条件下施氮对棉花产量和水分利用效率的影响分别如图 2、3(图中数字表示收集数据数量,下同)所示。随着年均降水量的增加,施加氮肥对棉花的

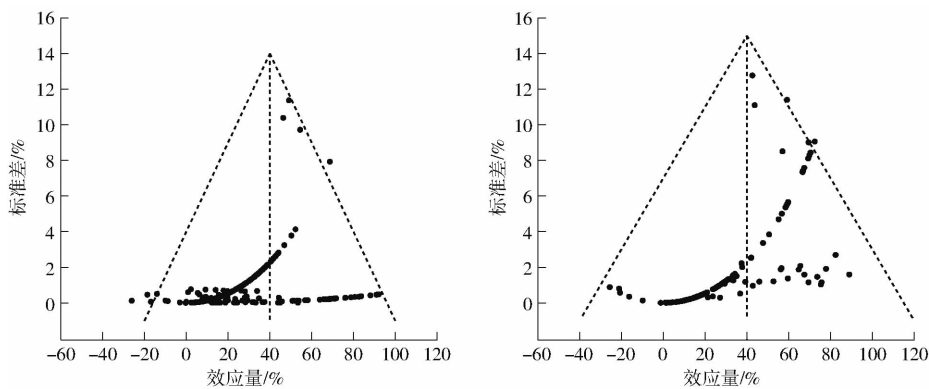


图 1 漏斗图
Fig. 1 Funnel plot

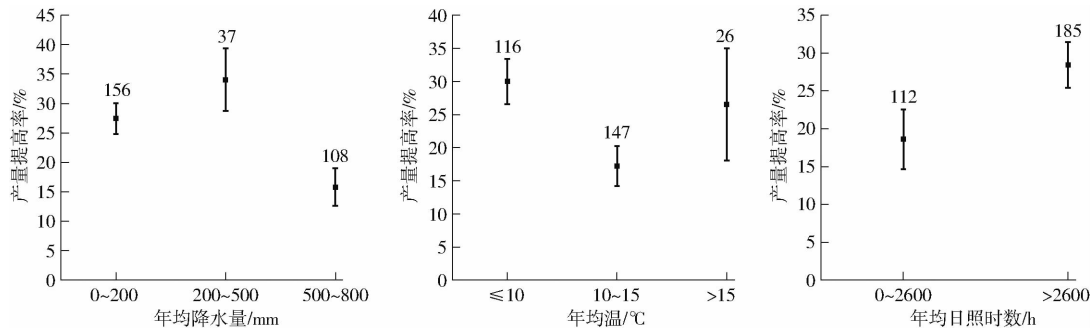


图 2 不同气候条件下施氮对棉花产量的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen application on cotton yield under different climatic conditions

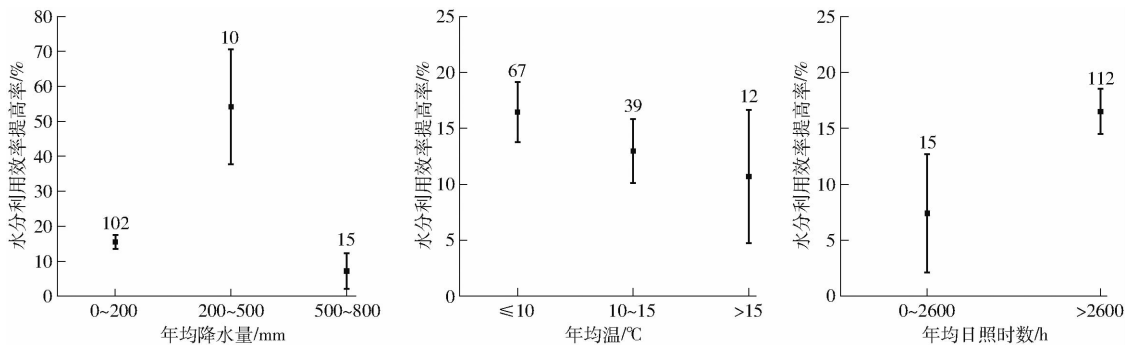


图 3 不同气候条件下施氮对水分利用效率的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen application on water use efficiency under different climatic conditions

增产效应呈先增高后降低趋势,当年均降水量为 200 ~ 500 mm 时,平均效应量达到最大,为 34.02%,95% 置信区间为 28.71% ~ 39.33%。年均降水量为 200 ~ 500 mm 的地区,施加氮肥可显著提高水分利用率 54.15%,而在年均降水量不足 200 mm 或者大于 500 mm 的地区,施加氮肥对提高水分利用率的效应较年降水量 200 ~ 500 mm 时略有降低,效应量分别为 15.49% 和 7.15%。

随着年均温的升高,施氮肥对产量的促进作用呈先降低后增高趋势,当年均温小于等于 10℃ 或者大于 15℃ 时,施氮肥对作物产量的促进作用较强,效应量分别为 29.98% 和 26.51%,95% 置信区间分别为 26.55% ~ 33.42% 和 18.04% ~ 34.98%;与不

施氮肥相比,施氮会显著提高水分利用率,随着年均温的升高,施氮对水分利用效率的提高作用逐渐减弱。当年均温小于等于 10℃ 时,效应量最大,为 16.45%,95% 置信区间为 13.75% ~ 19.14%。当年均温为 10 ~ 15℃ 和大于 15℃ 时,效应量分别为 12.97% 和 10.69%。施氮对产量和水分利用效率的提高作用均随年日照时数的增大而增大。当年日照时数小于等于 2000 h 时,施氮对产量和水分利用效率影响的效应量分别为 18.6% 和 7.4%,95% 置信区间分别为 14.65% ~ 22.56% 和 2.12% ~ 12.68%。当年日照时数大于 2000 h 时,施氮对产量和水分利用效率影响的效应量分别为 28.41% 和 16.5%,95% 置信区间分别为 25.4% ~ 31.43% 和

14.48% ~ 18.52%。

2.3 不同土壤因素对施氮条件下棉花产量和水分利用效率的影响

在不同土壤 pH 值、土壤类型和土壤有机质含量条件下施氮对棉花产量和水分利用效率的影响分别如图 4、5 所示。在不同土壤 pH 值条件下,施氮均会显著提高棉花产量和水分利用效率。当 pH 值为 6~8 时,施加氮肥对棉花产量和水分利用效率的

提高效应最为明显,效应量分别为 28.52% 和 24.59%,95% 置信区间分别为 24.95% ~ 32.09% 和 20.63% ~ 28.56%。当 pH 值小于 6 时,施加氮肥对作物产量和水分利用效率的平均效应量分别为 23.1% 和 14.30%,95% 置信区间为 17.28% ~ 28.92% 和 11.83% ~ 16.76%。当 pH 值大于 8 时,施加氮肥对作物产量和水分利用效率的平均效应量分别为 22.05% 和 7.88%,95% 置信区间为 19.16% ~

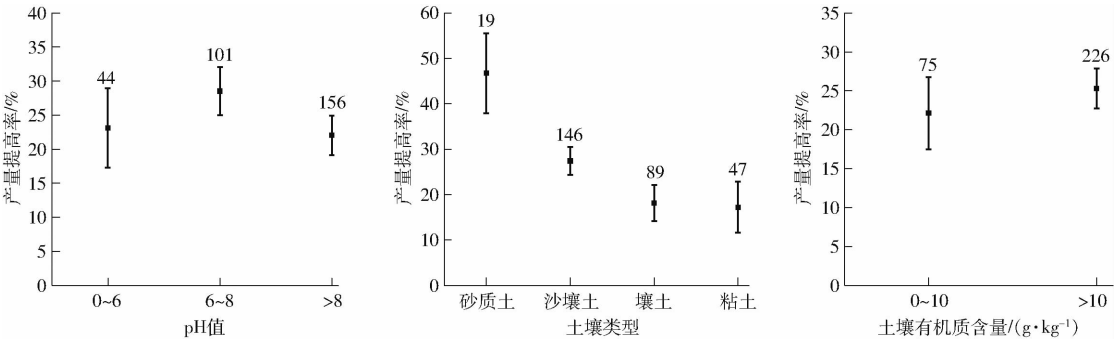


图 4 不同土壤因素对施氮条件下棉花产量的影响

Fig. 4 Effects of different soil factors on cotton yield under different nitrogen application conditions

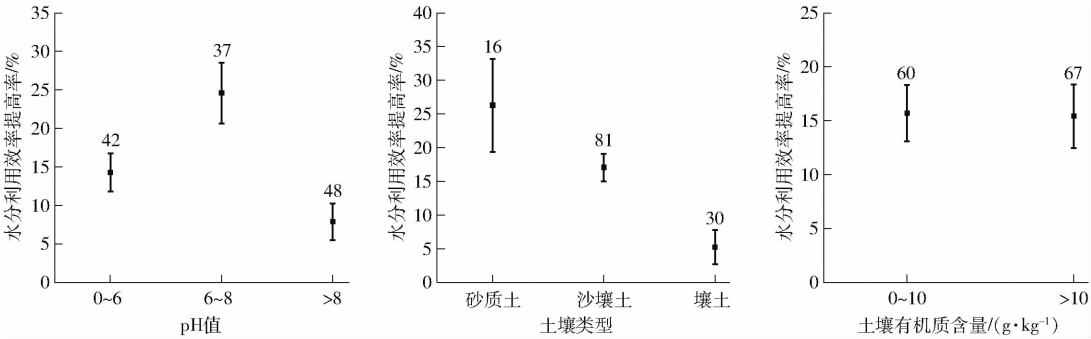


图 5 不同土壤因素对施氮条件下棉花水分利用效率的影响

Fig. 5 Effects of different soil factors on water use efficiency of cotton under different nitrogen application conditions

24.94% 和 5.51% ~ 10.25%。

施氮对棉花产量和水分利用效率的提高作用随土壤粘粒含量的增大而降低。在砂质土壤条件下施氮对产量和水分利用效率的提高效果最明显,效应量分别为 46.71% 和 26.29%,95% 置信区间分别为 37.92% ~ 55.50% 和 19.39% ~ 33.19%。随着有机质含量的增加,施氮对产量影响的效应量呈现小幅度增长趋势,对水分利用效率影响的效应量无显著变化。当有机质含量小于等于 10 g/kg 和大于 10 g/kg 时,施氮对产量和水分利用效率影响的效应量分别为 22.13%、15.70% 和 25.30%、15.42%,95% 置信区间为 17.49% ~ 26.77%、13.09% ~ 18.31% 和 22.72% ~ 27.87%、12.46% ~ 18.38%。

2.4 主要农田措施对施氮条件下棉花产量和水分利用效率的影响

施肥频次和全生育期灌水量对棉花产量和水分

利用效率的影响如图 6、7 所示。随着作物全生育期施肥频次的增加,棉花产量和水分利用效率的效应量均呈逐渐增加趋势。当全生育期施肥频次不大于 5 次时,施氮对产量和水分利用效率影响的效应量分别为 17.79% 和 10.63%,95% 置信区间分别为 14.71% ~ 20.87% 和 4.7% ~ 16.57%。当全生育期施肥频次大于 5 次时,施氮对产量和水分利用效率影响的效应量分别为 38.51% 和 19.67%,95% 置信区间分别为 34.77% ~ 42.25% 和 17.42% ~ 21.92%。随着全生育期灌水量的增加,施氮对产量和水分利用率的促进作用分别呈递增和先增加后降低趋势。当全生育期灌水量大于 500 mm 时,施氮对产量影响的效应量达到最大,为 39.29%,95% 置信区间为 30.45% ~ 48.13%。当全生育期灌水量为 250 ~ 500 mm 时,施氮对棉花提高水分利用率的提高作用最大,效应量为 15.42%,95% 置信区间为 12.98% ~ 17.87%。

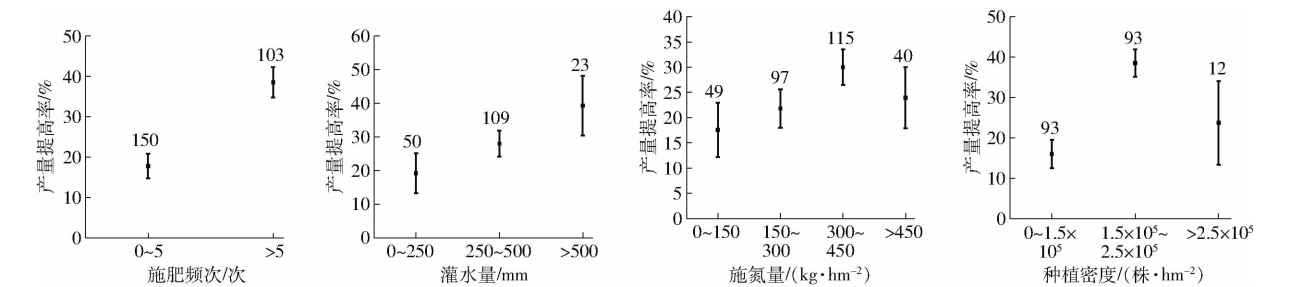


图 6 不同农田措施对施氮条件下棉花产量的影响

Fig. 6 Effects of different farmland measures on cotton yield under different nitrogen application conditions

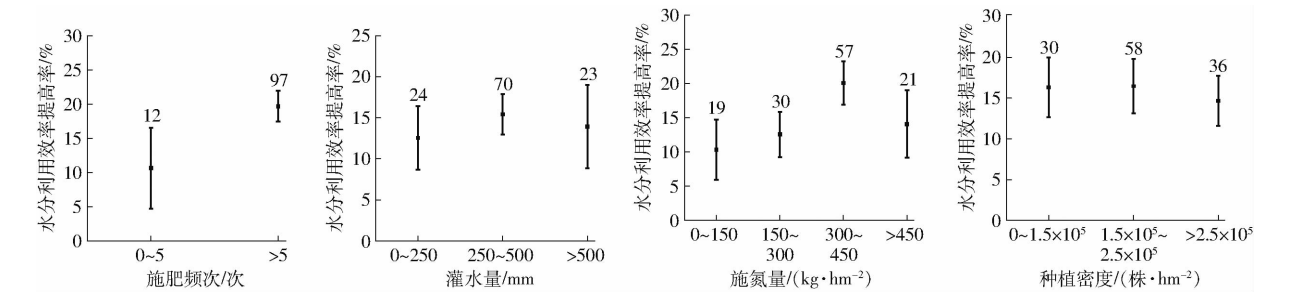


图 7 不同农田措施对施氮条件下棉花水分利用效率的影响

Fig. 7 Effects of different farmland measures on water use efficiency of cotton under different nitrogen application conditions

施氮量和种植密度对棉花产量和水分利用效率的影响如图 6、7 所示。随着施氮量的增加,棉花产量和水分利用效率的效应量均呈先增加后降低趋势,在施氮量为 300 ~ 450 kg/hm²时效应量均达到最大,效应量和 95% 置信区间分别为 29.99%、20.08% 和 26.48% ~ 33.51%、16.9% ~ 23.26%。这表明施氮量过低或过高均会影响棉花产量和水分利用效率。随着棉花种植密度的增大,施加氮肥对棉花产量和水分利用效率的提高作用均呈现先增加后降低的趋势。当种植密度为 1.5 × 10⁵ ~ 2.5 × 10⁵ 株/hm²时,施氮对棉花产量和水分利用效率影响的效应量达到最大,效应量和 95% 置信区间分别为 38.48%、16.46% 和 35.07% ~ 41.89%、13.15% ~ 19.78%。

2.5 施氮对产量和水分利用效率影响的偏相关分析

施加氮肥对产量和水分利用效率的影响会受到气象因素、土壤条件、田间管理措施的影响,为寻找施氮条件下棉花产量和水分利用效率的主要影响因素,选取年均降水量(X_1)、年均温(X_2)、年日照时数(X_3)、pH 值(X_4)、土壤类型(X_5)、有机质含量(X_6)、施肥频次(X_7)、灌水量(X_8)、施氮量(X_9)和种植密度(X_{10})作为自变量,产量和水分利用效率作为因变量进行偏相关分析,结果如表 4 所示,产量的偏相关系数绝对值排序为: $X_4 > X_9 > X_6 > X_8 > X_3 > X_2 > X_{10} > X_7 > X_5 > X_1$,结合显著性检验认为 X_4 和 X_9 为影响施氮条件下产量的主要因素;水分利用效率的偏相关系数绝对值排序为: $X_8 > X_9 > X_4 > X_6 > X_2 > X_3 > X_5 > X_1 > X_{10} > X_7$,结合显著性检验认

表 4 施氮棉田产量和水分利用效率影响因子偏相关分析结果										
项目	$X_1 \rightarrow Y$	$X_2 \rightarrow Y$	$X_3 \rightarrow Y$	$X_4 \rightarrow Y$	$X_5 \rightarrow Y$	$X_6 \rightarrow Y$	$X_7 \rightarrow Y$	$X_8 \rightarrow Y$	$X_9 \rightarrow Y$	$X_{10} \rightarrow Y$
产量	0.014	-0.156	0.158	0.322 **	-0.017	0.184	-0.065	0.160	0.320 **	0.074
水分利用效率	0.031	-0.085	0.074	0.148	0.071	-0.095	0.011	-0.608 **	0.358 **	-0.021

注: ** 表示通过 0.01 显著性检验。

为 X_8 和 X_9 为影响施氮条件下水分利用效率的主要因素。

3 讨论

3.1 气候条件对棉花产量和水分利用效率的影响

不同气候条件是影响作物生长发育、产量、水分和养分吸收的关键因素,因此气候条件会间接影响棉花产量和水分利用效率^[14]。水分是影响作物生

长状况的重要因素。有研究表明,在一定范围内,土壤含水率的增大会促进棉花吸收水分和营养物质,对作物起到强根和壮苗繁叶的作用,进而提高作物光合速率,为提高产量打下基础^[15]。土壤含水率随降水量的变化而变化,而土壤含水率会显著影响作物光合速率,当土壤含水率较低时,棉花光合速率稳定在较低水平,有研究表明,当土壤含水率超过 8% 时,光合速率随土壤含水率的增加而增大,但当土壤

含水率大于 18% 时,光合速率基本保持不变^[16]。降水过多会造成土壤氮素淋失及田间积水严重,导致根系功能受阻,造成棉花烂根、蕾铃脱落增加、结铃数下降,进而减产^[17]。因此,降水量过高或过低均不利于作物生长,本研究结果也呈现类似趋势,在年降水量为 200 ~ 500 mm 的地区施肥对产量的提高作用最大。本研究结果表明,在年降水量超过 500 mm 的地区,施氮肥对水分利用效率影响的效应量有所降低。这可能是由于当降水量过高时,土壤水分不能被作物充分吸收利用,大部分会以蒸发或渗漏的形式损失^[18],且较高的降水还会造成氮肥淋溶,降低氮肥效力。

脲酶活性与棉花产量呈现显著正相关关系^[19],低温下,土壤脲酶活性会受到抑制,处于较低水平,随着温度的升高,脲酶活性也会随之提高^[20]。有研究表明,在低温条件下施加氮肥会大幅增加脲酶活性^[21],进而提高作物对氮素的吸收利用效率^[22]。由于温度升高和施氮均会提高脲酶活性,因此在温度较高条件下,施氮对脲酶活性的提高作用较弱甚至不显著^[23]。当温度达到很高时,硝酸酶活性受抑制,增施氮肥可提高植株中的抗氧化酶活性及氮代谢酶活性,提高棉花 PS II 反应中心的光能转换效率,促进了生长发育,产量随施氮量的增大而增加^[24],本研究得到类似研究结果,与不施氮肥相比,在年均温度低于 10℃ 地区施加氮肥对作物产量的促进效应大于年均温为 10 ~ 15℃ 条件下施加氮肥对作物产量的促进效应。温度较高条件下(年均温大于 15℃)氮肥对产量的促进作用较高。在低温条件下土壤蒸发量较小,施氮会显著提高作物产量,因此水分利用率会得到较大程度提高。在温度较高的条件下,施氮会加大高温对作物的危害,不利于作物根系吸水,加剧作物水分散失,使耗水量加大,水分利用效率降低。有研究表明,棉花水分利用效率与气温呈现显著的负相关关系,随着温度升高,水分利用率有所下降^[11]。本研究结果也表明,随着温度的升高,施氮对棉花水分利用效率的效应量呈现递减趋势。

光照对棉花生长起到非常重要的作用,是影响棉花产量的一个重要气象条件^[25]。棉花是喜光作物,对光照的要求较高,在充足的光照下光合作用较强,生长比较旺盛^[26]。相比于年日照时数小于等于 2 600 h 的地区,在年日照时数大于 2 600 h 的地区,施加氮肥对作物产量和水分利用率提高作用较明显。王振华等^[27]认为充足的光照有利于作物的光合作用,从而促进作物生长,有利于叶面积迅速扩大,增加光合产物,进而提高水分利用率。还有研究

认为,在年日照时数较大地区的作物群体光合状态更好,对水分和养分的利用效率更高,进而提升了生物量的积累,较大程度提高了棉花的产量^[28]。张旺锋等^[29]研究表明,棉花花铃期的日照时数与产量极显著正相关,充足的光照有利于棉花的光合作用,从而增加了棉花的铃数,提高了铃重,增加了产量。

3.2 土壤条件对棉花产量和水分利用效率的影响

氮肥通过改变土壤条件、增加作物可利用氮素,进而影响作物生理生化代谢来影响作物产量和水分利用效率。有前人研究认为,中性土壤更有利于养分和酶活性的提高,氮素损失较小,更适合氮肥发挥最大效益,利于棉花生长发育,实现以肥促产^[30-31]。本研究结果也表明,在土壤 pH 值为 6 ~ 8 时施氮对棉花产量和水分利用效率的提高程度最大。叶全宝等^[32]通过研究砂土和粘土条件下氮肥对作物产量的增长效应认为氮素收获指数和氮肥生理利用率均表现为砂土大于粘土。含沙量愈高的土壤往往有机质含量和毛管孔隙度较低,所以在砂土中施氮对于土壤环境的改善程度更大,对产量的提高作用较明显^[33]。有研究表明,土壤有机质含量较低的土壤氮素含量较高,在施氮条件下,土壤有机质含量与氮肥农学效率呈显著正相关^[34]。本研究结果也表明,在土壤有机质含量较高的土壤中施氮对棉花产量的提升作用更大,但在有机质含量不同的土壤中施氮对棉花水分利用效率的影响不明显,这可能由于水分利用效率受其他因素的影响程度更大。

3.3 管理措施对棉花产量和水分利用效率的影响

本研究认为与低频次施肥(不大于 5 次)相比,高频次施肥(5 次以上)更能充分发挥肥力,显著提高棉花增产和水分利用效率。这可能由于肥料分多次施入可减少氨挥发等损失,提高氮素利用效率,有研究表明随着氮肥施用次数的增加可显著增加棉花干物质量和籽棉产量^[35-36],通过少量多次施肥可明显增强水分吸收功能,可以提高水分利用率^[37]。在水分亏缺条件下施加氮肥可减轻水分亏缺对作物产量的不利影响^[38]。有研究认为水氮协同配合会加速作物生长发育进而提高产量^[39],随着水分的适量增加,施加氮肥更能充分发挥效应,对产量的促进效应更加明显^[40]。本研究认为生育期灌溉量为 250 ~ 500 mm 的地区,棉花的水分利用率相对较高。灌溉量太低会影响作物正常生理代谢,不利于高产和水分利用率的提高,而灌溉量太大会造成土壤水分蒸发加大,植物吸收利用率低^[41]。

氮素是棉花生长发育不可缺少的营养元素之一^[42]。施氮量在一定范围内,棉花产量会随着施氮量的增加而增加^[43]。氮素处于较低水平时,会造成

作物根系总表面积变小,根较短,营养吸收受抑制^[44],因此与不施氮肥相比,低量施氮对产量的促进效应相对较低。而随着氮素供应的增加,促进了根系发育,提高了叶面积和叶绿素含量,增强了光合效应,有利于产量积累^[45]。随着施氮量的增加,与不施氮相比,施氮对产量的促进作用呈现增长趋势。但过量施肥会导致棉花贪青晚熟以及僵铃脱落^[46],氮肥农学效率下降^[47],因此施氮对产量的促进效应减弱。氮肥对水分的吸收与利用也存在明显的调控作用^[48],在一定施氮量范围内,增施氮肥水分利用效率会提高;施氮过量则会导致水分利用率降低^[49]。本研究认为,随着施氮量的增加,由于作物有效耗水会相应增加,利于作物吸收水分和营养物质,所以水分利用率会相应增加;但当施氮量过高时,作物对氮素的需求已经较大程度得到了满足,对水分的吸收能力已经接近上限,所以当施氮量大于 450 kg/hm²时,施氮对水分利用率的提高作用有所下降。

适宜的种植密度是增加产量和提高水分利用率的重要因素,适度加大种植密度,使棉花植株具有紧凑的结构,可以大幅提高棉花产量^[50],这是机械化收获的必然要求,种植密度不合理会降低产量和水分有效利用率。有研究表明,棉花种植密度为 1.8 × 10⁵ 株/hm²时产量最高^[51],种植密度低于 2.25 × 10⁵ 株/hm²,施氮对产量的促进作用会随着密度的增加而增加^[52]。种植密度过高会降低耕作层土壤积温,增加棉田的耗水量,降低水分利用效

率^[53]。本文研究结果与之类似,在种植密度为 1.5 × 10⁵ ~ 2.5 × 10⁵ 株/hm²时施氮对产量和水分利用效率的提高作用最大,这可能由于该密度下更有利于水、氮等营养物质充分发挥效应。

4 结论

- (1)施氮对棉花产量和水分利用效率的提高作用随年均降水量的增加呈先增高后降低趋势,在年均降水量为 200 ~ 500 mm 时达到最大;随着年均温的升高,施氮对产量和水分利用效率的提高作用分别呈现先降低后升高和逐渐降低的趋势;施氮对棉花产量和水分利用效率的促进作用随年日照时数的增加而增大。
- (2)当土壤 pH 值为 6 ~ 8 时,施氮对棉田产量和水分利用效率的提高作用最为明显。施氮对棉花产量和水分利用效率的提高作用随土壤粘粒含量的增大而降低。随着土壤有机质含量的增加,施氮对产量的提高作用呈小幅度增强趋势,对水分利用效率无显著影响。
- (3)施氮对棉花产量和水分利用效率的提高作用随着施肥频次的增加而加强,随着灌水量的增加分别呈不断增加和先增高后降低的趋势。当种植密度为 1.5 × 10⁵ ~ 2.5 × 10⁵ 株/hm²时,施氮对产量和水分利用效率的提高作用最大。
- (4)施氮条件下棉花产量的主要影响因子为施氮量和土壤 pH 值,棉花水分利用效率的主要影响因子为施氮量和灌水量。

参 考 文 献

[1] 武良, 张卫峰, 陈新平, 等. 中国农田氮肥投入和生产效率[J]. 中国土壤与肥料, 2016, 15(4): 76 - 83.
WU Liang, ZHANG Weifeng, CHEN Xinping, et al. Nitrogen fertilizer input and nitrogen use efficiency in Chinese farmland [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2016, 15(4): 76 - 83. (in Chinese)

[2] 胡田田, 崔晓路, 李梦月, 等. 不同氮肥增效剂和水氮用量对冬小麦产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 302 - 310.
HU Tiantian, CUI Xiaolu, LI Mengyue, et al. Effect of different nitrogen fertilizer synergists, water and nitrogen amount on winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 302 - 310. (in Chinese)

[3] 司转运, 高阳, 申孝军, 等. 水氮供应对夏棉产量、水氮利用及土壤硝态氮累积的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3945 - 3954.
SI Zhuanyun, GAO Yang, SHEN Xiaojun, et al. Effects of nitrogen and irrigation water application on yield, water and nitrogen utilization and soil nitrate nitrogen accumulation in summer cotton[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 3945 - 3954. (in Chinese)

[4] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713 - 726.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 713 - 726. (in Chinese)

[5] 李广浩, 赵斌, 董树亭, 等. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1406 - 1415.
LI Guanghao, ZHAO Bin, DONG Shuting, et al. Effect of coupling controlled release urea with water on yield and photosynthetic characteristics in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1406 - 1415. (in Chinese)

[6] 郭丙玉, 高慧, 唐诚, 等. 水肥互动对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3679 - 3686.

- GUO Bingyu, GAO Hui, TANG Cheng, et al. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3679–3686. (in Chinese)
- [7] BARATI V, GHADIRI H, ZAND-PARSA S, et al. Nitrogen and water use efficiencies and yield response of barley cultivars under different irrigation and nitrogen regimes in a semi-arid Mediterranean climate[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61: 15–32.
- [8] 国家统计局关于2022年棉花产量的公告[N]. 北京:中国信息报社,2022.
- [9] 尔晨,林涛,夏文,等. 灌溉定额和施氮量对机采棉田水分运移及硝态氮残留的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 497–510.
- ER Chen, LIN Tao, XIA Wen, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen levels on yield, water distribution and nitrate nitrogen residue of machine-harvested cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(2): 497–510. (in Chinese)
- [10] 李越鹏,张富仓,侯翔皓,等. 种植密度和水氮互作对南疆棉花生长和水氮利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2021, 49(9): 45–56, 66.
- LI Yuepeng, ZHANG Fucang, HOU Xianghao, et al. Effect of planting density and water-nitrogen interaction on cotton growth and water-nitrogen utilization in southern Xinjiang[J]. Journal of Northwest A&F University, 2021, 49(9): 45–56, 66. (in Chinese)
- [11] 伍维模,董合林,王萍,等. 水分与氮素对南疆膜下滴灌棉花水分利用效率与蒸腾速率的影响[J]. 西北农业学报, 2006, 15(1): 11–15.
- WU Weimo, DONG Helin, WANG Ping, et al. The effects of water and nitrogen on water use efficiency and transpiration rate in mulched-cotton by drip irrigation in South-Xinjiang[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2006, 15(1): 11–15. (in Chinese)
- [12] 李昊,李世平,南灵,等. 中国棉花地膜覆盖产量效应的Meta分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 228–235.
- LI Hao, LI Shiping, NAN Ling, et al. Meta-analysis of effect of plastic film mulching on cotton yield in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 228–235. (in Chinese)
- [13] LI C, HOFFLAND E K, YU T, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains[J]. Nature Plants, 2020, 6(6): 653–660.
- [14] 白春华,红梅,韩国栋,等. 土壤三种酶活性对温度升高和氮肥添加的响应[J]. 内蒙古大学学报, 2012, 43(5): 509–513.
- BAI Chunhua, HONG Mei, HAN Guodong, et al. Response of three kinds of enzyme activity to simulate warming and nitrogen addition[J]. Journal of Inner Mongolia University, 2012, 43(5): 509–513. (in Chinese)
- [15] 何佩云,张余,周良,等. 干旱胁迫及氮肥调控对苦荞植株形态、生理特性及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(1): 128–134.
- HE Peiyun, ZHANG Yu, ZHOU Liang, et al. Effect of drought stress and nitrogen fertilizer regulation on morphology, physiological characteristics, and yield of *Fagopyrum tataricum*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(1): 128–134. (in Chinese)
- [16] 郭璇,罗海明. 新疆莫索湾垦区降水与灌溉对棉花产量的影响[J]. 农业工程技术, 2016, 36(23): 14.
- [17] 刘梅先,杨劲松,李晓明,等. 膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3203–3210.
- LIU Meixian, YANG Jingsong, LI Xiaoming, et al. Effects of irrigation amount and frequency on soil water distribution and water use efficiency in a cotton field under mulched drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3203–3210. (in Chinese)
- [18] 刘万代,王化岑,杨青华,等. 施氮对土壤水分亏缺下冬小麦生产力的影响[J]. 土壤通报, 2000(6): 262–264, 285.
- LIU Wandai, WANG Huacen, YANG Qinghua, et al. Influence of N fertilizer on winter wheat productivity under soil water stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000(6): 262–264, 285. (in Chinese)
- [19] 郭晓雯,刘佳炜,郑志玉,等. 全生育期咸水滴灌对土壤盐分累积和棉花生长的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1952–1965.
- GUO Xiaowen, LIU Jiawei, ZHENG Zhiyu, et al. Effect of saline water drip irrigation on soil salt accumulation and cotton growth during the whole growth period[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1952–1965. (in Chinese)
- [20] 高钰,雍少宁,王俊峰. 增温对青藏高原高寒沼泽草甸不同时期土壤酶活性的影响[J]. 生态科学, 2023, 42(1): 1–10.
- GAO Yu, YONG Shaoning, WANG Junfeng. Effects of experimental warming on soil enzyme activities in different seasons of the alpine swamp meadow ecosystem on the Qinghai–Tibet Plateau[J]. Ecological Science, 2023, 42(1): 1–10. (in Chinese)
- [21] 闫春妮,黄娟,李稹,等. 湿地植物根系及其分泌物对土壤脲酶、硝化-反硝化的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 303–308.
- YAN Chunni, HUANG Juan, LI Zhen, et al. Effect of plant roots and its exudates on urease activity, nitrification and denitrification in wetland soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(2): 303–308. (in Chinese)
- [22] 秦宇坤,李鹏程,郑苍松,等. 氮肥施用量对棉花产量及土壤脲酶活性的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2018, 41(2): 86–92.
- QIN Yukun, LI Pengcheng, ZHENG Cangsong, et al. Effects of nitrogen application rate on the cotton yield and soil urease activity[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2018, 41(2): 86–92. (in Chinese)
- [23] 王培华,史文娟,张艳超. 土壤水氮调控对盐碱地棉花生长发育及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 33–42.
- WANG Peihua, SHI Wenjuan, ZHANG Yanchao. Improving soil water and nitrogen management to facilitate growth and water-

nitrogen use efficiency of cotton in saline-alkali soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(9): 33 – 42. (in Chinese)

[24] 杜红霞, 冯浩, 吴普特, 等. 水、氮调控对夏玉米根系特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(1): 89 – 94, 100. DU Hongxia, FENG Hao, WU Pute, et al. Influence of water and N fertilizer regulation on root growth characteristics of summer maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(1): 89 – 94, 100. (in Chinese)

[25] 侯慧杰. 新疆棉花生育期气象灾害对棉花生长的影响及应对措施研究[J]. *农业灾害研究*, 2023, 13(1): 22 – 24. HOU Huijie. Impact of meteorological hazards on cotton growth and response measures during the cotton fertility period in Xinjiang[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2023, 13(1): 22 – 24. (in Chinese)

[26] 狄佳春, 许乃银, 陈旭升, 等. 长江流域气象因素对棉花产量及其构成因子的影响[J]. *中国棉花*, 2003, 30(6): 25 – 27.

[27] 王振华, 朱延凯, 张金珠, 等. 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理特性与产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 296 – 308. WANG Zhenhua, ZHU Yankai, ZHANG Jinzhu, et al. Effects of water and nitrogen fertilization on physiological characteristics and yield of cotton under drip irrigation in mildly salinized soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6): 296 – 308. (in Chinese)

[28] 曹丽娟. 酒泉市日照时数变化特征及对农业生产的影响分析[J]. *农业灾害研究*, 2023, 13(2): 124 – 126. CAO Lijuan. Analysis on the change characteristics of sunshine hours and its impact on agricultural production in Jiuquan City[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2023, 13(2): 124 – 126. (in Chinese)

[29] 张旺锋, 勾玲, 王振林, 等. 不同生态棉区棉花单铃重的变化及与气象因子关系的研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(7): 872 – 877. ZHANG Wangfeng, GOU Ling, WANG Zhenlin, et al. Changes of cotton single boll weight at different eco-region and correlation with meteorological factor[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(7): 872 – 877. (in Chinese)

[30] 贡璐, 张雪妮, 吕光辉, 等. 塔里木河上游典型绿洲不同土地利用方式下土壤质量评价[J]. *资源科学*, 2012, 34(1): 120 – 127. GONG Lu, ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, et al. Soil quality assessment under different land use types in typical oasis of the upper reaches of the Tarim River[J]. *Resources Science*, 2012, 34(1): 120 – 127. (in Chinese)

[31] 郝胜磊, 蔡廷瑶, 冯小杰, 等. 新型肥料对全球三大粮食作物产量和土壤生物学活性影响的 Meta 分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1496 – 1505. HAO Shenglei, CAI Tingyao, FENG Xiaojie, et al. Effects of new fertilizers on the yield and soil biological activity of three major food crops: a global Meta-analysis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1496 – 1505. (in Chinese)

[32] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. *作物学报*, 2005, 31(11): 38 – 44. YE Quanbao, ZHANG Hongcheng, WEI Haiyan, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(11): 38 – 44. (in Chinese)

[33] 杨晨璐, 刘兰清, 王维钰, 等. 麦玉复种体系下秸秆还田与施氮对作物水氮利用及产量的效应研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(9): 1664 – 1680. YANG Chenlu, LIU Lanqing, WANG Weiyu, et al. Effects of the application of straw returning and nitrogen fertilizer on crop yields, water and nitrogen utilization under wheat-maize multiple cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9): 1664 – 1680. (in Chinese)

[34] 余瑞新, 欧阳建平, 王端飞, 等. 赣东北地区水稻土的有机质变化及其与产量和肥料利用率的相互关系[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(5): 42 – 45. YU Ruixin, OUYANG Jianping, WANG Duanfei, et al. Change in soil organic matter content and its relations with rice grain yield and fertilizer use efficiency in paddy soil of northeastern Jiangxi[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, 27(5): 42 – 45. (in Chinese)

[35] 殷星, 禄涛, 曾庆涛, 等. 氮肥滴施次数及比例对机采棉产量和氮肥利用率的影响[J]. *新疆农业科学*, 2019, 56(11): 1971 – 1978. YIN Xing, LU Tao, ZENG Qingtao, et al. Effects of nitrogen fertigation frequency and proportion on yield and nitrogen use efficiency of machine-picked cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(11): 1971 – 1978. (in Chinese)

[36] 索岩松. 滴灌施肥量和施肥次数对大田棉花生长和养分利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. SUO Yansong. Effect of fertigation level and frequency on growth and nutrient utilization of field cotton[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)

[37] KUŞÇU H, TURHAN A, ÖZMEN N, et al. Response of red pepper to deficit irrigation and nitrogen fertigation[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(10): 1396 – 1410.

[38] WANG R, KANG Y, WAN S. Effects of different drip irrigation regimes on saline-sodic soil nutrients and cotton yield in an arid region of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 153: 1 – 8.

[39] 冯克云, 张秉贤, 南宏宇. 河西内陆灌区不同灌水施氮水平对棉花产量构成的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(6): 49 – 53. FENG Keyun, ZHANG Bingxian, NAN Hongyu. Effect of different water and nitrogen supply on yield and its components of cotton in inland irrigation district of Hexi in Gansu[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(6): 49 – 53. (in Chinese)

[40] 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 164 – 172.

- WU Lifeng, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of water and fertilizer coupling on cotton yield, net benefits and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 164 – 172. (in Chinese)
- [41] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 荒漠气候区膜下滴灌棉花需水量和灌溉制度的试验研究[J]. 水利学报, 2002, 33(11): 119 – 123.
- CAI Huanjie, SHAO Guangcheng, ZHANG Zhenhua. Water demand and irrigation scheduling of drip irrigation for cotton under plastic mulch[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(11): 119 – 123. (in Chinese)
- [42] 傅庆林, 俞劲炎, 陈英旭. 氮素营养对水稻干物质和氮分配的影响及氮肥需求量[J]. 浙江大学学报, 2000, 26(4): 399 – 403.
- FU Qinglin, YU Jinyan, CHEN Yingxu. Effect of nitrogen applications on dry matter and nitrogen partitioning in rice and nitrogen fertilizer requirements for rice production[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 2000, 26(4): 399 – 403. (in Chinese)
- [43] SINGANDHUPE R B, RAO G, PATIL N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersiconesculentum* L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 327 – 340.
- [44] 田长彦, 卞卫国, 曾凡江, 等. 施氮对棉花苗期根系分布和养分吸收的影响[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 374 – 379.
- TIAN Changyan, BIAN Weiguo, ZENG Fanjiang, et al. Study on the effects of applying nitrogen fertilizer on root distribution and nutrient uptake of cotton plants at seeding stage[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(3): 374 – 379. (in Chinese)
- [45] 李广浩, 赵斌, 董树亭, 等. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1406 – 1415.
- LI Guanghao, ZHAO Bin, DONG Shuting, et al. Effects of coupling controlled release urea with water on yield and photosynthetic characteristics in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1406 – 1415. (in Chinese)
- [46] 宋兴虎, TUFAIL Ahmed Wagan, BIAN GKHAM Souliyanonh, 等. 氮肥用量及其后效对棉花产量和生物质累积动态的影响[J]. 棉花学报, 2018, 30(2): 145 – 154.
- SONG Xinghu, TUFAIL Ahmed Wagan, BIAN GKHAM Souliyanonh, et al. Nitrogen fertilizer and its residual effect on cotton yield and biomass accumulation[J]. Cotton Science, 2018, 30(2): 145 – 154. (in Chinese)
- [47] 李培岭, 张富仓. 根系分区交替滴灌下水氮耦合对棉花氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 112 – 116.
- LI Peiling, ZHANG Fucang. Effects of water and nitrogen coupling on cotton nitrogen absorption and utilization under alternate root partition drip[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Sup.1): 112 – 116. (in Chinese)
- [48] 罗宏海, 张宏芝, 陶先萍, 等. 水氮运筹对膜下滴灌棉花光合特性及产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 407 – 415.
- LUO Honghai, ZHANG Hongzhi, TAO Xianping, et al. Effects of water and nitrogen management modes on the leaf photosynthetic characters and yield formation of cotton with under-mulch drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 407 – 415. (in Chinese)
- [49] 刘万代, 王化岑, 杨青华, 等. 施氮对土壤水分亏缺下冬小麦生产力的影响[J]. 土壤通报, 2000(6): 262 – 264, 285.
- LIU Wandai, WANG Huacen, YANG Qinghua, et al. Influence of N fertilizer on winter wheat productivity under soil water stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000(6): 262 – 264, 285. (in Chinese)
- [50] 王全九, 王康, 苏李君, 等. 灌溉施氮和种植密度对棉花叶面积指数与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 300 – 312.
- WANG Quanjiu, WANG Kang, SU Lijun, et al. Effect of irrigation amount, nitrogen application rate and planting density on cotton leaf area index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 300 – 312. (in Chinese)
- [51] 辛明华, 王占彪, 李小飞, 等. 新疆棉区机采种植模式下棉花种植密度研究[J]. 山东农业科学, 2020, 52(1): 46 – 52.
- XIN Minghua, WANG Zhanbiao, LI Xiaofei, et al. Study on suitable planting density of cotton under machine-picked planting mode in South Xinjiang[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(1): 46 – 52. (in Chinese)
- [52] 陈利军, 林涛, 吴凤全, 等. 种植密度和灌溉定额互作对 76 cm 等行距机采棉生长发育及产量形成影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(12): 2899 – 2908.
- CHEN Lijun, LIN Tao, WU Fengquan, et al. Effect of planting density and irrigation quota on growth and development and yield formation of 76 cm equal row spacing machine-picked cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(12): 2899 – 2908. (in Chinese)
- [53] 张恒恒, 王香茹, 胡莉婷, 等. 不同机采棉种植模式和种植密度对棉田土壤水热效应及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 39 – 47.
- ZHANG Hengheng, WANG Xiangru, HU Liting, et al. Effect of different machine-harvested cotton planting patterns and planting densities on soil hydrothermal conditions and cotton yield[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 39 – 47. (in Chinese)