

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23081

养分专家系统推荐施肥对新疆棉花产量与养分吸收、利用和平衡的影响

樊林鑫^{1, 2}, 哈丽哈什·依巴提¹, 李传龙³, 艾尼·买买提⁴, 杜友萍⁵, 张炎^{1*}

(1. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830091; 2. 新疆农业大学资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 昌吉市农业推广中心, 新疆 昌吉 831199; 4. 巴楚县农业推广中心, 新疆 巴楚 843899; 5. 沙湾市农业推广中心, 新疆 沙湾 832104)

摘要:为验证棉花养分专家系统推荐施肥在新疆南北疆区的适用性, 研究了养分专家推荐施肥对棉花产量、经济效益、养分吸收和肥料利用率的影响。2020年, 在新疆沙湾、昌吉和巴楚开展田间试验, 每个试验设6个处理: 基于养分专家系统的推荐施肥(NE); 农民习惯施肥(FP); 基于测土配方施肥或当地农技推广部门推荐施肥(ST); NE推荐基础上不施氮肥(NE-N); NE推荐基础上不施磷肥(NE-P); NE推荐基础上不施钾肥(NE-K)。结果表明, 沙湾、昌吉和巴楚试验点, NE处理产量高于ST和FP处理, 其中沙湾分别增产4.71%和6.68%, 昌吉分别增产5.53%和9.58%, 巴楚分别增产5.81%和9.47%。3个试验点中, NE较ST和FP处理分别增收2682.13~4027.40和4278.95~6895.06元/hm²。NE处理在增产的同时也能提高养分吸收及肥料利用率, 沙湾NE处理氮、磷、钾肥利用率显著高于ST和FP处理, 分别提高14.65%和9.08%、10.93%和15.92%、7.26%和8.53%。昌吉NE处理氮肥利用率显著高于FP处理, 提高21.69%; 昌吉NE处理磷、钾肥利用率显著高于ST和FP处理, 分别提高29.38%和34.60%、32.16%和40.37%。巴楚NE处理氮、磷肥利用率显著高于ST和FP处理, 分别提高12.84%和12.02%、16.76%和24.21%; 巴楚NE处理钾肥利用率高于FP处理, 提高4.39%。沙湾NE较ST和FP处理, 氮农学效率分别提高1.98和2.00 kg/kg, 磷农学效率分别提高2.58和3.29 kg/kg, 钾农学效率分别提高1.82和3.74 kg/kg。昌吉NE较FP处理, 氮农学效率提高4.03 kg/kg; NE较ST和FP处理, 磷农学效率分别提高10.59和11.81 kg/kg, 钾农学效率分别提高6.27和8.08 kg/kg。巴楚NE较ST和FP处理, 氮农学效率分别提高2.43和2.51 kg/kg, 磷农学效率分别提高3.29和4.61 kg/kg; NE较FP处理, 钾农学效率提高1.89 kg/kg。NE氮、磷、钾沙湾试验点盈亏率分别为27.10%、46.82%、59.54%; 昌吉试验点盈亏率分别为16.39%、6.25%、18.30%; 巴楚试验点盈亏率分别为61.04%、48.53%、27.81%。棉花养分专家系统推荐了平衡氮、磷、钾肥的施肥配比, 在保证产量的同时, 有效提高了棉花的养分吸收、肥料利用率和经济效益。

关键词: 养分专家系统; 棉花; 推荐施肥; 养分吸收; 肥料利用率

棉花是新疆干旱半干旱地区重要的纤维作物, 2022年新疆棉花种植面积达249.688万hm², 占全国的83.22%, 棉花总产539.1万t, 占全国的90.2%^[1-3]。施肥是作物增产最有效的途径之一。新疆通常被认为是缺氮、少磷、钾丰富的地区, 重施

氮肥、磷肥, 轻施钾肥、微肥和有机肥, 造成化肥的严重损失和环境污染^[4-6]。因此, 农田需要合理施用化肥, 保护土壤基本养分, 以肥培土, 使肥料施用做到经济合理, 降低成本, 提高肥料利用率^[7]。如今, 作物施肥的方法可以分为两类, 一类是以土壤测试为基础的测土推荐施肥方法^[8-10], 另一类是肥料效应函数法, 这两类方法大都较为复杂、繁琐, 需要的专业知识能力较高, 时间成本较大。养分专家系统是基于计算机软件的施肥决策系统, 并综合考虑氮、磷、钾养分的科学施肥方法^[10]。养分专家系统以汇总近几十年全国范围的肥料田间试验为基础, 建立了作物产量反应、农学效率及养分吸收与

收稿日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-07-04

基金项目: 农田智慧施肥项目(NK2022180502); 国家重点研发计划(2016YFD0200102); 农业农村部荒漠绿洲作物生理生态与耕作重点实验室开放课题(25107020-202104)。

作者简介: 樊林鑫(1997-), 硕士研究生, 主要从事棉花养分高效管理研究。E-mail: Fanlinx07@163.com。

通讯作者: 张炎, E-mail: yanzhangxj@163.com。



利用信息的数据库,能更便捷、方便地指导施肥,更便于农户操作,同时避免作物对某种养分的奢侈吸收,减少土壤肥力的耗竭,有效防止因过量施肥导致的潜在环境风险的出现^[8],从而实现农业可持续发展的愿景。孙绘健等^[11]研究发现,养分专家系统推荐施肥可有效增产、提高经济效益,并且能够提高棉花对养分的吸收。Xu等^[12]研究发现,养分专家系统推荐施肥不仅可以提高玉米产量和养分吸收,还可以减少肥料成本,并有效减少养分损失和土壤环境污染。姚礼发等^[13]研究发现,养分专家系统推荐氮、磷、钾配合施肥能有效促进水稻生长发育,穗粒数明显增多。因此,养分专家系统推荐施肥,作物既能有效减肥又能稳产,达到了减施增效,有效预防施肥过量或养分亏缺对土壤造成损害。当前养分专家系统已在水稻^[14]、小麦^[15]、玉米^[16]、棉花^[17]等作物上使用,棉花养分专家系统推荐施肥还需在不同生态环境中进一步验证。因此,本研究通过田间试验,分析棉花养分专家系统推荐施肥对新疆沙湾市、昌吉市和巴楚县3个试验点棉花产量、效益、养分吸收及肥料利用以及养分平衡的影响,验证棉花养分专家系统的可行性,为沙湾、昌吉和巴楚棉花科学施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年分别布置在塔城地区沙湾市四道河子镇(44°40′26″N,85°41′21″E)、昌吉州昌吉市佃坝镇(44°10′24″N,87°20′50″E)和喀什地区巴楚县多来提巴格乡(39°47′45″N,78°34′28″E)进行。沙湾市属中温带大陆性干旱气候,年降水量245 mm,年无霜期180 d,年均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温3500 $^{\circ}\text{C}$ 。昌吉市属温带大陆性干旱气候,年降水量180 mm,年无霜期173 d,年均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温3592 $^{\circ}\text{C}$ 。巴楚县属暖温带大陆性干旱气候,年降水量45.14 mm,年无霜期225 d,年均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温4600 $^{\circ}\text{C}$ 。各试验点土壤理化性质见表1。

沙湾试验点供试品种为新陆早84号,2020年4月15播种,9月30日收获。昌吉试验点供试品种为新陆早57号,2020年4月11日播种,9月29日收获。巴楚试验点供试品种为新陆中80号,2020年4月6日播种,10月15日收获。沙湾和昌吉两地均采用膜下滴灌种植模式,一膜三带六行,行距配置66+10+66+10+66+10=228 cm,株距10 cm。巴楚采取覆膜漫灌种植模式,一膜四行,行距配置25+40+25+60=150 cm,株距9 cm。

供试氮肥为尿素(N 46%),供试基施磷肥为三料磷肥(P_2O_5 46%)或磷酸二铵(N 18%, P_2O_5 46%)、追施磷肥为磷酸一铵(N 12%, P_2O_5 60%),供试钾肥为硫酸钾(K_2O 50%)。

1.2 试验方法

试验地采用随机区组设计,沙湾和昌吉小区面积为 $6.75\text{ m}\times 7\text{ m}=47.3\text{ m}^2$ 、巴楚小区面积为 $6.4\text{ m}\times 7\text{ m}=44.8\text{ m}^2$ 。各试验点设6个处理:NE为基于养分专家系统的推荐施肥;ST为当地农技推广部门推荐施肥;FP为农民习惯施肥;NE-N为NE推荐基础上不施氮肥;NE-P为NE推荐基础上不施磷肥;NE-K为NE推荐基础上不施钾肥。各试验点处理施肥情况见表2。

沙湾NE处理氮肥为尿素,全部作为追肥,在棉花生育期分6次随水滴施:分别于6月6日、6月18日、6月29日、7月11日、7月20日、7月30日滴施;磷肥为三料磷肥和磷酸一铵,70%以三料磷肥作为基肥施入,30%以磷酸一铵在苗期(6月6日)随水追施;钾肥为硫酸钾,50%在蕾期(6月18日)追施,50%在铃期(6月29日)追施。ST处理氮肥为尿素,全部作为追肥,在棉花生育期分6次随水滴施;磷肥为磷酸一铵,全部追施;钾肥为硫酸钾,50%在蕾期追施,50%在铃期追施。FP处理氮肥为尿素,全部作为追肥,在棉花生育期分5次随水滴施;磷肥为三料磷肥和磷酸一铵,60%以三料磷肥作为基肥施入,40%以磷酸一铵作为追肥,在棉花生育期分

表1 供试土壤基础理化性质

试验点	土层 (cm)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	pH
沙湾	0~20	0.27	0.75	11.45	12.77	32.00	35.58	135.96	8.23
昌吉	0~20	0.15	0.79	12.14	10.21	30.00	19.07	124.13	8.11
巴楚	0~20	0.39	0.76	9.36	14.78	32.00	43.60	149.00	8.62

表 2 各处理施肥量 (kg/hm²)

试验点	处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
沙湾	NE	251	159	134
	ST	340	225	112
	FP	268	290	146
	NE-N	0	159	134
	NE-P	251	0	134
	NE-K	251	159	0
昌吉	NE	222	90	86
	ST	150	279	143
	FP	328	320	112
	NE-N	0	90	86
	NE-P	222	0	86
	NE-K	222	90	0
巴楚	NE	239	109	68
	ST	392	173	42
	FP	342	345	0
	NE-N	0	109	68
	NE-P	239	0	68
	NE-K	239	109	0

2 次随水滴施；钾肥为硫酸钾，50% 在蕾期追施，50% 在铃期追施。

昌吉 NE 处理氮肥为尿素和磷酸一铵，全部作为追肥，在棉花生育期分 6 次随水滴施（分别于 6 月 4 日、6 月 19 日、6 月 30 日、7 月 9 日、7 月 19 日、7 月 27 日滴施）；磷肥为三料磷肥和磷酸一铵，70% 以三料磷肥作为基肥施入，30% 以磷酸一铵在苗期（6 月 4 日）随水追施；钾肥为硫酸钾，50% 在蕾期（6 月 19 日）追施，50% 在铃期（6 月 30 日）追施。ST 处理氮肥为尿素和磷酸一铵，17% 作为基肥，83% 作为追肥；磷肥为磷酸二铵和磷酸一铵，23% 以磷酸二铵作为基肥，77% 以磷酸一铵作为追肥；钾肥为硫酸钾，40% 作基肥，60% 作追肥。FP 处理氮肥为尿素、磷酸一铵、磷酸二铵，17% 以磷酸二铵作为基肥，83% 以尿素、磷酸一铵作为追肥在生育期分 5 次随水滴施；磷肥为磷酸二铵和磷酸一铵，38% 以磷酸二铵作为基肥，62% 以磷酸一铵作为追肥在生育期随水滴施；钾肥为硫酸钾，全部基施。缺素处理在 NE 施肥基础上不施氮、磷、钾。

巴楚 NE 处理氮肥为尿素，30% 作为基肥，

70% 在棉花生育期分 3 次于 6 月 27 日、7 月 4 日、7 月 30 日浇水前施用；磷肥为三料磷肥，全部作为基肥施入；钾肥为硫酸钾，50% 作为基肥，50% 作为追肥于花铃期在浇水前施用（7 月 30 日）。ST 处理氮肥 38% 以磷酸二铵基施，62% 作为追肥，以尿素在棉花生育期分 2 次在浇水前施用；磷肥为磷酸二铵，全部基施；钾肥为硫酸钾，全部基施。FP 处理氮肥为尿素和磷酸二铵，40% 作为基肥，60% 作为追肥以尿素在棉花生育期分 2 次在浇水前施用；磷肥为磷酸二铵，全部基施；FP 处理未施钾肥。缺素处理在 NE 施肥基础上不施氮、磷、钾。

1.3 样品采集与测定指标

土壤基础养分测定：全氮采用凯氏定氮法，全磷采用钼锑抗比色法，全钾采用火焰光度法，有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法，碱解氮采用碱解扩散法，有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法，速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法，pH 值采用电位法^[18]。

棉花养分测定：在棉花收获期，每个小区选取长势均匀的植株 3 株，分茎+叶+棉壳、棉纤维、棉籽不同器官分离开，在 105℃ 杀青 30 min，75℃ 烘干至恒重，称重后粉碎制样。全氮采用奈氏比色法、全磷采用钼锑抗比色法、全钾采用火焰光度法测定^[18]。

棉花产量测定：在棉花吐絮期调查每个小区 6.67 m² 总铃数、总株数，各小区取棉株上、中、下部位共 50 朵，测定单铃重。

肥料利用率的计算^[19]：

氮肥表观利用率 (%) = (施氮区棉株吸氮量 - 不施氮区棉株吸氮量) / 施氮量 × 100；

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施肥区籽棉产量 / 施氮量；

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量；

磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥料利用率计算与以上氮的计算公式相同。巴楚 FP 处理未施钾肥，不纳入计算。

产投比 = 纯收益 / 化肥投入。

计算农田中养分平衡时一般以肥料投入和作物收获物中的养分为主，因棉花秸秆全部还田，仅考虑籽棉携出养分。另外，不考虑因淋洗、挥发和反硝化造成的养分损失。



养分平衡采用表观平衡法计算, 即平衡值 = 养分投入量 - 籽棉携出量, 养分盈亏率 (%) = (平衡值 / 养分投入量) × 100, 正值表示盈余, 负值表示亏缺。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据采用 Excel 2022 整理、Origin 2022 绘图、SPSS 21.0 统计分析, 采用 Duncan 法在 0.05 水平下进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对棉花产量及经济效益的影响

沙湾 NE 较 ST 处理分别减施 N 89 kg/hm²、P₂O₅ 66 kg/hm², 增施 K₂O 22 kg/hm², 较 FP 处理减施 N 17 kg/hm²、P₂O₅ 131 kg/hm²、K₂O 12 kg/hm²; 昌吉 NE 较 ST 处理增施 N 72 kg/hm², 减施 P₂O₅ 189 kg/hm²、K₂O 57 kg/hm², 较 FP 处理减施 N 106 kg/hm²、P₂O₅

230 kg/hm²、K₂O 26 kg/hm²; 巴楚 NE 较 ST 处理分别减施 N 153 kg/hm²、P₂O₅ 64 kg/hm², 增施 K₂O 26 kg/hm², 较 FP 处理减施 N 103 kg/hm²、P₂O₅ 236 kg/hm², 增施 K₂O 68 kg/hm²。

3 个试验点 (沙湾、昌吉、巴楚) NE 处理产量均最高, 较 ST 和 FP 处理相比, NE 处理在沙湾分别增产 4.71% 和 6.68%, 昌吉分别增产 5.53% 和 9.58%, 巴楚分别增产 5.81% 和 9.48%。沙湾、昌吉、巴楚 NE 处理均能增加棉花纯收益。沙湾 NE 较 ST 和 FP 处理分别增收 3167 和 4365 元/hm², 昌吉分别增收 4027 和 6895 元/hm², 巴楚分别增收 2682 和 4279 元/hm²。沙湾、昌吉、巴楚 NE 较 ST 和 FP 处理产投比提高 5.56 和 6.94、13.00 和 18.31、6.39 和 8.66。沙湾、昌吉、巴楚 NE 处理纯效益均显著高于 ST 和 FP 处理, 达到棉花增产增收的效果 (表 3)。

表 3 施肥对棉花经济效益的影响

试验点	处理	产量 (kg/hm ²)	产值 (元/hm ²)	肥料投入 (元/hm ²)	纯效益 (元/hm ²)	产投比
沙湾	NE	7535a	56510a	2439	54070a	22.2a
	ST	7196ab	53970ab	3067	50903b	16.6b
	FP	7063b	52971b	3265	49705b	15.2c
	NE-N	6590	49424	1415	48008	33.9
	NE-P	6950	52121	1582	50538	31.9
	NE-K	6711	50335	1881	48454	25.8
昌吉	NE	7798a	58488a	1749	56739a	32.4a
	ST	7390b	55423b	2712	52711ab	19.4b
	FP	7117b	53374b	3530	49844b	14.1c
	NE-N	6456	48423	843	47579	56.4
	NE-P	6586	49396	1264	48132	38.1
	NE-K	7060	52946	1390	51555	37.1
巴楚	NE	4425a	33184a	1846	31337a	17.0a
	ST	4182b	31362b	2707	28655b	10.6b
	FP	4042b	30313b	3254	27058b	8.3c
	NE-N	3319	24890	871	24019	27.6
	NE-P	3867	29005	1258	27746	22.0
	NE-K	3997	29975	1562	28412	18.2

注: 2020 年新疆籽棉收购价 7.5 元/kg, N: 4.08 元/kg, P₂O₅: 5.39 元/kg, K₂O: 4.17 元/kg; 不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

2.2 不同处理对棉花养分吸收的影响

研究表明 (图 1), 从棉花籽棉养分吸收来看, 沙湾籽棉氮、磷、钾积累量 NE 处理均最高, 氮、磷积累量 NE 较 ST 和 FP 处理无显著差异, 氮积

累量分别提高 3.75% 和 4.84%; 磷积累量分别提高 4.06% 和 4.59%; 钾积累量 NE 较 ST 无显著差异, 较 FP 处理显著提高 14.16%。昌吉籽棉氮、磷积累量 NE 处理均最高, 钾积累量 ST 处理为最高。氮

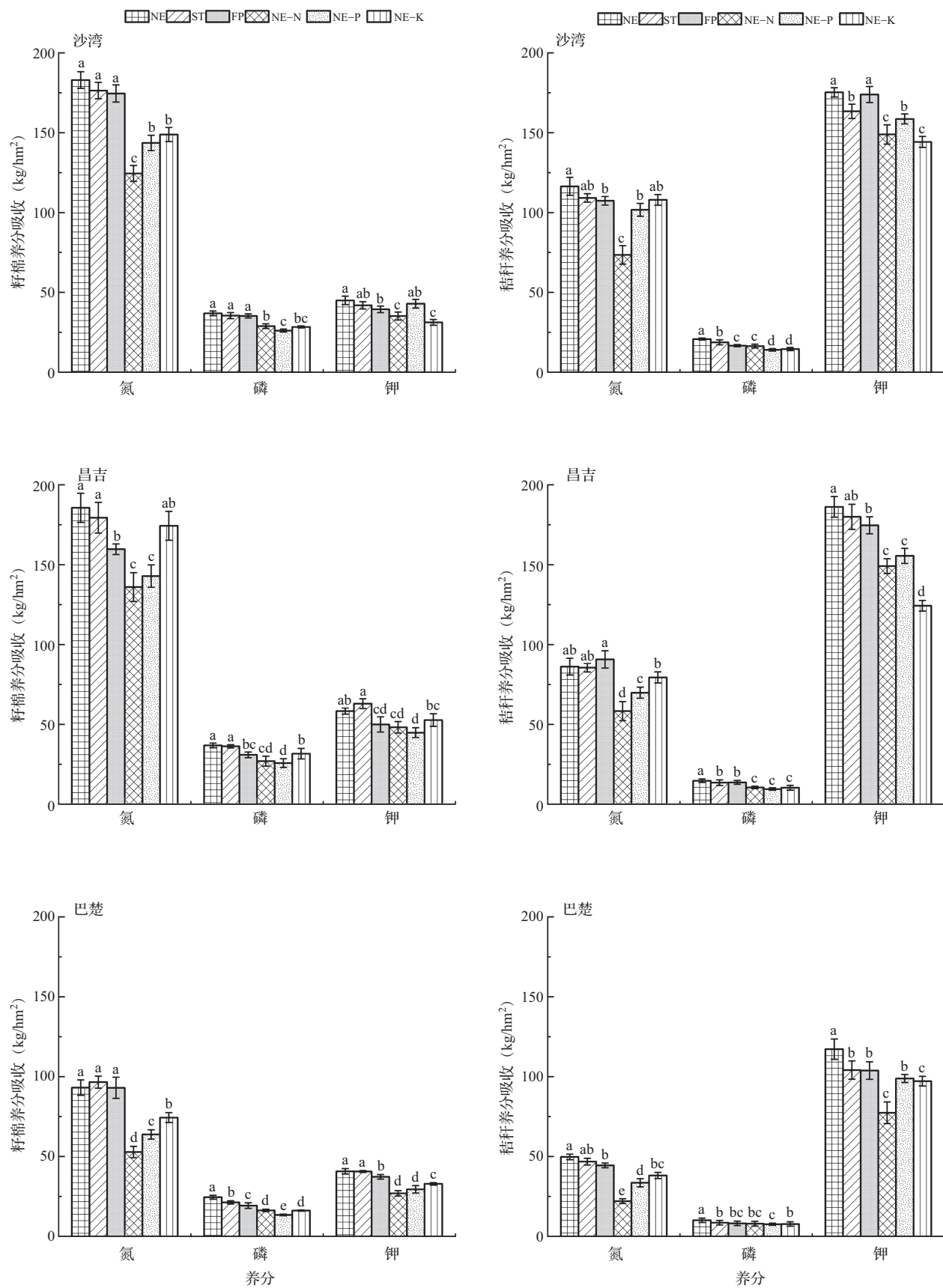
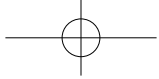


图 1 不同施肥处理对棉花秸秆和籽棉养分积累量的影响

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。



积累量 NE 较 ST 处理无显著差异, 较 FP 显著提高 16.24%; 磷积累量 NE 较 ST 处理无显著差异, 但较 FP 显著提高 18.92%; 钾积累量 NE 较 FP 显著提高 16.72%。巴楚籽棉磷、钾积累量 NE 处理均最高, 氮积累量 ST 处理最高。氮积累量 ST 较 NE 无显著差异; 磷积累量 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 15.06% 和 27.08%; 钾积累量 NE 较 ST 无显著差异, 较 FP 显著提高 9.29%。3 个试验点 NE 处理籽棉吸收总养分均为最高, 可以看出 NE 处理对棉花养分吸收起着促进作用。

从棉花秸秆养分吸收来看, 沙湾氮积累量 NE 较 ST 无显著差异, 较 FP 处理显著提高 8.39%; 磷积累量 NE 处理较 ST 和 FP 处理分别显著提高 10.81% 和 24.69%; 钾积累量 NE 较 ST 显著提高 7.28%, 但较 FP 无显著差异。昌吉磷、钾积累量 NE 均最高, 氮积累量 NE 较 ST 无显著差异; 磷积累量 NE 较 ST 和 FP 处理分别显著提高 8.97% 和 7.55%; 钾积累量 NE 较 ST 无显著差异, 较 FP 差异显著, 提高 6.62%。巴楚氮、磷、钾积累量 NE 均最高, 氮积累量 NE 较 FP 显著提高 11.96%; 磷积累量 NE 较 ST 和 FP 差异显著, 分别提高 17.58% 和 24.01%; 钾积累量 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 12.60% 和 12.89%。

沙湾、昌吉和巴楚 NE 较 ST 和 FP 处理百千克籽棉吸收 N、P₂O₅、K₂O 差异不显著, 其中 NE 处理分别为 3.97、1.75、3.52 和 3.49、1.51、3.78 及 3.23、1.79、4.30 kg; ST 分别为 3.97、1.73、3.44 和 3.59、1.55、3.97 及 3.43、1.64、4.17 kg; FP 分别为 3.99、1.68、3.64 和 3.52、1.44、3.81 及 3.40、1.56、4.22 kg。

2.3 不同处理对棉花肥料利用率的影响

由表 4 可知, 沙湾和巴楚氮肥表观利用率均表现为 NE>FP>ST, 昌吉氮肥表观利用率表现为 ST>NE>FP; 磷肥表观利用率 3 个点均表现为 NE>ST>FP; 沙湾和昌吉钾肥表观利用率均表现为 NE>ST>FP, 巴楚 FP 处理未施钾肥, 钾肥表观利用率表现为 NE>ST。沙湾氮、磷、钾肥表观利用率 NE 较 ST 和 FP 处理均显著提高, 氮肥表观利用率分别提高 14.65 和 9.08 个百分点; 磷肥表观利用率分别提高 10.93 和 15.92 个百分点; 钾肥表观利用率分别提高 7.26 和 8.53 个百分点。昌吉氮肥表观利用率 NE 较 FP 显著提高 21.69 个百分点; 磷表观利用率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 29.38 和 34.60 个百分点; 钾肥表观利用率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 32.16 和 40.37 个百分点。巴楚氮肥表观利用率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 12.84 和 12.02 个百分点; 磷肥表观利用率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 16.76 和 24.21 个百分点; 钾肥表观利用率 NE 较 ST 提高 4.39 个百分点。

由表 4 可知, 沙湾、昌吉和巴楚 3 个试验点氮农学效率分别表现为 NE>ST>FP、ST>NE>FP、NE>FP>ST; 磷农学效率均表现为 NE>ST>FP; 钾农学效率分别表现为 NE>ST>FP、NE>ST>FP、NE>ST。沙湾氮农学效率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 1.98 和 2.0 kg/kg; 磷农学效率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 2.58 和 3.29 kg/kg; 钾农学效率 NE 较 ST 无显著差异, 但较 FP 差异显著, 分别提高 1.82 和 3.73 kg/kg。昌吉氮农学效率 ST 最高, 但较 NE 无

表 4 施肥对棉花肥料利用率的影响

试验点	处理	表观利用率 (%)			农学效率 (kg/kg)			偏生产力 (kg/kg)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
沙湾	NE	40.41a	25.23a	41.57a	3.76a	3.68a	6.14a	30.02a	47.39a	56.23b
	ST	25.76c	14.30b	34.31b	1.78b	1.10b	4.33ab	21.16c	31.98b	64.25a
	FP	31.33b	9.31c	33.04b	1.76b	0.39b	2.41b	26.35b	24.35c	48.38c
昌吉	NE	38.78a	41.28a	91.59a	6.05a	13.47a	8.59a	35.13b	86.65a	90.68a
	ST	43.28a	11.90b	59.43b	6.22a	2.88b	2.33b	49.27a	26.49b	52.04c
	FP	17.09b	6.67b	51.22c	2.01b	1.66b	0.51b	21.70c	22.24c	63.54b
巴楚	NE	30.32a	28.44a	81.21	4.63a	5.11a	6.29	18.51a	40.59a	65.07
	ST	17.48b	11.68b	76.82	2.20b	1.82b	4.40	10.67c	24.17b	99.56
	FP	18.30b	4.23c	—	2.11b	0.51c	—	11.82b	11.72c	—

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

显著差异, NE 较 FP 显著提高 4.03 kg/kg; 磷农学效率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 10.59 和 11.81 kg/kg; 钾农学效率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 6.27 和 8.08 kg/kg。巴楚氮农学效率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 2.43 和 2.51 kg/kg; 磷农学效率 NE 较 ST 和 FP 处理差异显著, 分别提高 3.29 和 4.61 kg/kg; 钾农学效率 NE 较 ST 提高 1.89 kg/kg。

由表 4 可知, 沙湾和巴楚氮偏生产力均表现为 NE>FP>ST、昌吉氮偏生产力表现为 ST>NE>FP, 3 个试验点磷偏生产力均表现为 NE>ST>FP, 沙湾、昌吉和巴楚钾偏生产力分别表现为 ST>NE>FP、NE>FP>ST、ST>NE。除巴楚和沙湾 ST 钾偏生产力高于 NE, 昌吉 ST 氮偏生产力高于 NE, 其他偏生产力均为 NE 最高。沙湾 NE 较 FP 氮、磷、钾偏生产力差异显著, 分别提高 3.67、23.04、7.85 kg/kg。昌吉 NE 较 FP 氮、磷、钾偏生产力差异显著, 分别提高 13.43、64.41、27.14 kg/kg。巴楚 NE 较 FP 氮、磷偏生产力差异显著, 分别提高 6.69、28.87 kg/kg。

2.4 不同处理对棉田土壤养分平衡的影响

由表 5 可知, 沙湾、昌吉和巴楚 FP 处理氮、磷、钾均出现较高盈余, 3 个试验点 FP 较 NE 处理氮、磷、钾盈余量分别增加 22.23、134.71、18.73 和 130.03、243.42、37.07 及 106.88、247.95、-63.83 kg/hm²。所有处理中 ST 处理昌吉的氮和巴楚的钾表现亏缺, 盈亏率为 -19.60% 和 -16.49%。ST 处理昌吉和巴楚推荐施氮、钾量较低, 不能满足棉花生长所需要的氮、钾素营养, 导致棉花从土

壤中吸收土壤贮备养分, 使得土壤氮、钾养分贮备亏缺。巴楚 FP 处理没有施钾肥, 导致棉田土壤钾养分供应不足, 影响棉花生长发育, 造成土壤钾素亏缺。

其余处理氮、磷、钾素表现均为盈余, 沙湾 ST 处理氮素盈余最高, 其次是 FP 处理, 都显著高于 NE 处理, 沙湾 NE 氮盈亏率较 ST 和 FP 分别低 21.03 和 7.77 个百分点; FP 处理磷素盈余最高, 其次为 ST 处理, 都显著高于 NE 处理, 磷盈亏率 NE 较 ST 和 FP 处理分别低 17.06 和 25.30 个百分点; 钾盈亏率 NE 较 FP 处理低 7.93 个百分点。昌吉 FP 处理氮素盈余最高, ST 处理出现亏缺, 昌吉 NE 氮盈亏率较 FP 处理低 34.93 个百分点; 昌吉 FP 处理磷素盈余最高, 其次为 ST 处理, 都显著高于 NE 处理, 磷盈亏率 NE 较 ST 和 FP 处理分别低 63.93 和 71.57 个百分点; 昌吉 ST 处理钾素盈余最高, 其次为 FP 处理, 都显著高于 NE 处理, 钾盈亏率 NE 较 ST 和 FP 处理分别低 28.65 和 27.96 个百分点。巴楚 ST 处理氮素盈余最高, 其次是 FP 处理, 都显著高于 NE 处理, 巴楚 NE 处理氮盈亏率较 ST 和 FP 处理分别低 14.33 和 11.77 个百分点; 巴楚 FP 处理磷素盈余最高, 其次为 ST 处理, 都显著高于 NE 处理, 磷盈亏率 NE 较 ST 和 FP 处理分别低 23.29 和 38.68 个百分点; 巴楚 FP 处理钾素出现亏缺。综上所述, NE 较 ST 和 FP 处理在保证作物养分吸收的同时, 减少了土壤中氮、磷、钾养分盈余, 但仍有下降空间, 应在当前基础上继续适当减量。

表 5 棉花养分积累量及表观平衡计算

试验点	处理	施肥量 (kg/hm ²)			移走量 (kg/hm ²)			盈余量 (kg/hm ²)			盈亏率 (%)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
沙湾	NE	251	159	134	183.70a	84.56a	54.22a	67.30c	74.44c	79.78b	27.10c	46.81c	59.54c
	ST	340	225	112	179.90a	81.26a	50.53ab	160.10a	143.74b	61.47c	48.13a	63.88b	54.89b
	FP	268	290	146	178.47a	80.84a	47.49b	89.53b	209.16a	98.51a	34.87b	72.15a	67.47a
昌吉	NE	222	90	86	183.94a	84.37a	70.27a	38.06b	5.63c	15.73c	16.39b	6.25c	18.30b
	ST	150	279	143	173.76b	83.19a	75.87a	-23.76c	195.81b	67.13a	-19.60c	70.18b	46.94a
	FP	328	320	112	159.91c	70.95b	60.20b	168.09a	249.05a	51.80b	51.31a	77.83a	46.25a
巴楚	NE	239	109	68	98.47a	56.11a	49.09a	140.53c	52.89c	18.91a	61.04b	48.53c	27.81
	ST	392	173	42	95.51a	48.76b	48.93a	296.49a	124.24b	-6.93b	75.37a	71.81b	-16.49
	FP	342	345	0	94.59a	44.15b	44.92b	247.41b	300.85a	-44.92c	72.81a	87.20a	—



3 讨论

3.1 养分专家系统推荐施肥对棉花产量及经济效益的影响

科学施肥是提高棉花产量的技术保障,农户过度追求作物高产而投入大量肥料,不仅会导致营养吸收过剩,还会造成资源浪费及环境污染等问题^[20]。因此,科学施肥能在保证作物产量的前提下,提高作物对养分的吸收量,降低农户生产成本。养分专家系统推荐施肥将作物产量形成所需养分、土壤肥力水平和生长环境等因素进行了综合考虑,科学规划施用氮、磷、钾肥的品种、用量、时期和位置,确保棉花养分供应^[10]。马征等^[21]研究表明,养分专家系统推荐施肥较农民习惯施肥处理减少氮、磷、钾肥施用量的情况下,大葱养分专家系统推荐施肥较农民习惯施肥和当地农技推广部门推荐施肥处理分别增产 6.04% 和 12.30%。杨中保等^[22]研究表明,水稻养分专家系统推荐的氮、磷、钾施肥量对沿淮淮北一季中稻具有较为明显的增产效应,养分专家系统推荐施肥较农民习惯施肥平均减氮 23.1%,所呈现的规律均与本试验规律相类似。本研究中,沙湾、昌吉和巴楚 3 个试验点 NE 较 ST 处理增产 4.71% ~ 5.81%; NE 较 FP 处理增产 6.68% ~ 9.58%。养分专家系统是对土壤基础肥力进行评定,综合考虑了作物养分需要,最大限度提高肥料利用率,从而推荐施肥更为科学、合理。

3.2 养分专家系统推荐施肥对棉花养分吸收的影响

棉花养分积累量是棉花吸收养分的体现,也是提高棉花产量和肥料利用率的基础^[16, 19]。孙绘健等^[11]研究表明,养分专家系统推荐施肥能够有效提高棉花对氮、磷、钾的养分吸收,并不是施肥量越多,吸收就越多,合理施肥和配比有利于籽棉对养分的吸收。本试验结果表明,虽然 ST 和 FP 处理施肥量高于 NE 处理,但养分积累量以及产量并未高于 NE 处理,过量的施肥不能使作物增产。盲目施肥、肥料配比结构不合理、肥料的施用不能耦合棉花生育进程和阶段需肥规律等问题,未能发挥滴灌施肥的技术优势,造成肥料资源浪费和环境污染,严重制约着棉花产量的提高。而 NE 处理在减少化肥投入的同时,并未减少棉花产量以及养分吸收量,说明在合适施肥范围内。合理施肥不仅有利于养分从营养器官到生殖器官转化,而且有利于作物对养分的均衡吸收,将养分胁迫降低,从而达到高产高效的目标。

3.3 养分专家系统推荐施肥对肥料利用率的影响

肥料利用率是衡量肥料合理施用的重要参考指标^[23],试验结果表明,棉花养分专家系统推荐施肥更科学,不仅提高棉花产量,同时显著提高了肥料利用率。沙湾和巴楚 NE 处理氮、磷、钾肥料利用率均高于 ST 处理,由于 ST 处理昌吉的氮肥和巴楚的钾肥施肥量不足,不能满足棉花生长所需要的氮、钾养分,导致棉花吸收土壤中的养分,从而造成土壤养分亏缺。沙湾和昌吉试验点 NE 处理的氮、磷、钾肥料利用率均高于 FP 处理。巴楚试验点 NE 处理氮、磷肥料利用率都显著高于 FP 处理,因此,NE 处理施肥较 ST 和 FP 处理更为合理。孙绘健等^[11]在库尔勒市养分专家系统推荐施肥处理氮肥回收利用率分别比测土配方和农民习惯施肥处理提高 12.2 和 23.7 个百分点;邹娟等^[19]研究表明,大豆养分专家系统推荐施肥较习惯施肥处理,氮素回收率提高 17.8 个百分点;宋蝶等^[14]研究表明,养分专家系统推荐施肥水稻氮、钾的利用率在苏北地区较习惯施肥分别显著提高 4.9 和 19.4 个百分点,所呈现的规律均与本研究规律相同。

沙湾和巴楚 NE 处理氮、磷、钾农学效率均为最高。昌吉 ST 处理氮农学效率较 NE 提高 0.18 kg/kg,是由于 ST 处理较 NE 减施氮肥 72 kg/hm²,但 ST 处理氮素出现亏缺状况。当前在棉花生产中农民习惯施肥存在偏施氮、磷肥,施氮量过大以及氮、磷、钾养分配比不合理等问题。FP 处理过量施用氮肥和磷肥,不仅对棉花增产没有促进作用,还会导致大量肥料残留在土壤中。NE 处理肥料利用率高于 ST 和 FP 处理,表明棉花养分专家系统综合考虑作物产量反应和土壤基础养分等,从而推荐氮、磷、钾施肥更为合理。本研究 3 个试验点 NE 处理适当降低肥料用量,优化氮、磷、钾肥配比和施用时期^[24],可促进棉花对养分的吸收利用,是提高肥料利用效率的有效措施,同时实现了节本增效。

3.4 养分专家系统推荐施肥对土壤养分平衡的影响

农田土壤养分平衡法是对农田土壤养分输入量与输出量进行计算分析,评价表观养分利用与盈余情况,分析施肥对农业环境影响的重要方法。土壤养分平衡状况与作物产量水平有关^[25]。合理的施肥量,不仅要补充土壤中的养分,保证作物养分吸收,同时也需要把养分盈余控制在合理范围内,避免因养分盈余过多而引起环境污染。当 $-10\% \leq$ 养分盈亏率 $\leq 10\%$,为养分平衡;养分盈亏率 $< -10\%$,为养分亏缺;养分盈亏率 $> 10\%$,为养分盈余^[26]。

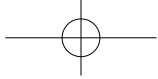
沙湾、昌吉和巴楚3个试验点NE处理氮盈亏率16.39%~61.04%、磷盈亏率6.25%~48.53%、钾盈亏率18.30%~59.54%。总体来看,NE较ST和FP处理在氮、磷、钾养分平衡方面表现较高的优势。FP处理3个试验点氮和磷均出现较高盈余量,分别为89.53和209.16、168.09和249.05、247.41和300.85 kg/hm²。大量的土壤养分盈余,会造成了肥料资源浪费和经济损失,长期盲目增施氮会造成氮素在作物耕层及以下无效积累,磷素进入到土壤中,易与金属离子反应,形成磷酸盐,固定在土壤中,导致磷素利用率低。NE较ST和FP处理盈亏率最低,NE处理施肥方案不仅减施增产,而且有良好的生态环境效益。魏建林等^[27]研究表明,养分专家系统推荐施肥处理减少了氮养分投入,平衡磷钾养分投入,在减少投入的同时,并且实现了养分专家系统推荐施肥与农民习惯施肥及当地农技推广部门推荐施肥相持平的产量,减小了农业生产中氮素在土壤中的残留量,所呈现的规律均与本研究规律相类似。土壤养分平衡状态不仅能反映土壤养分含量,而且也是保证土壤生产力的基础。

4 结论

根据沙湾、昌吉和巴楚试验点的土壤基础供肥能力,应用棉花养分专家系统进行推荐的施肥量分别为N 251 kg/hm²、P₂O₅ 159 kg/hm²、K₂O 134 kg/hm²和N 222 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 86 kg/hm²及N 239 kg/hm²、P₂O₅ 109 kg/hm²、K₂O 68 kg/hm²,3个试验地NE较ST处理增产4.71%~5.81%,较FP处理增产6.68%~9.58%。NE在降低肥料用量的同时,实现棉花增产增收。3个试验地NE较ST处理氮、磷、钾表观利用率分别提高12.84~14.65、10.93~29.38、4.39~32.16个百分点,较FP处理氮、磷、钾表观利用率分别提高9.08~21.69、15.92~34.60、8.53~40.37个百分点,NE处理施肥显著提高棉花氮、磷、钾肥的表观利用率。NE较FP处理氮、磷、钾肥盈亏率分别降低7.77~34.93、25.30~71.57、7.93~27.96个百分点,有效减小了化肥在农田土壤中的过度盈余。养分专家系统推荐施肥的产投比高于农民习惯施肥及农技推广部门推荐施肥,达到减施增产的效果,减少由化肥过量投入造成的环境污染问题,因此,养分专家系统推荐施肥具有较高的生态效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 买买提·莫明,艾先涛,艾海提·阿木提,等. 对我国棉花主要产区产业兴旺的思考[J]. 棉花科学, 2022, 44(3): 3-8.
- [2] 国家统计局. 关于2022年棉花产量的公告[N]. 中国信息报, 2022-12-27(001).
- [3] 王雪颖,吕慧捷,周鸿森,等. 我国棉花产业链发展现状及展望[J]. 农业与技术, 2022, 42(14): 139-142.
- [4] 候宗贤,张惠文,丁英. 新疆土壤有效钾状况与棉花施钾肥效果[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 197-198.
- [5] Chen Y, Hu S, Guo Z, et al. Effect of balanced nutrient fertilizer: a case study in Pinggu district, Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 754: 142069.
- [6] 李林洋,夏淑洁,张润花,等. 氮钾互作对长江流域棉花产量和氮肥利用效率的影响及适宜施肥水平研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(1): 40-46.
- [7] 刘志良,徐健,吴宗亭. 长江流域棉区棉花合理施肥环节及技术[J]. 棉花科学, 2013, 35(3): 55-57.
- [8] Sonawane S S, Sonar K R. Application of Mitscherlich-Bray equation for fertilizer use in pearl millet on vertisol[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1995, 43(2): 276-277.
- [9] Wolfe D W, Henderson D W, Hsiao T C, et al. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(6): 865-870.
- [10] 何萍,金继运, Mirasol F P, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.
- [11] 孙绘健,姚青青,何忠盛,等. 养分专家系统推荐施肥对棉花产量及肥料效率的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8): 1406-1417.
- [12] Xu X P, He P, Qiu S J, et al. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China[J]. Field Crops Research, 2014, 163: 10-17.
- [13] 姚礼发,吴萍萍,姚文麒,等. 专家系统推荐施肥对水稻生长和氮素利用的影响[J]. 现代农业科技, 2019(24): 3-4, 6.
- [14] 宋蝶,陈新兵,董洋阳,等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 68-75.
- [15] 王宜伦,白由路,王磊,等. 基于养分专家系统的小麦-玉米推荐施肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4483-4492.
- [16] 徐新朋,魏丹,李玉影,等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1458-1467.
- [17] 哈丽哈什·依巴提,李传龙,刘欢,等. 基于产量反应的棉花推荐施肥效应[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(1): 72-79.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-38.
- [19] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 745-752.



- [20] 徐丽萍, 杨其军, 王玲, 等. 新疆地区农业面源污染空间分异研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 150-153, 158.
- [21] 马征, 魏建林, 刘东升, 等. 养分专家系统推荐施肥对章丘大葱产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 172-177.
- [22] 杨中保, 郭海, 汪霄, 等. 养分专家系统推荐施肥对水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(16): 151-153.
- [23] Jin D D, Gao J P, Jiang P, et al. Nitrogen use efficiency and rice yield of different locations in northeast China[J]. National Academy Science Letters-India, 2017, 40(4): 227-232.
- [24] 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.
- [25] 侯云鹏, 孔丽丽, 徐新朋, 等. 基于养分专家系统推荐施肥在东北玉米上的长期综合效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 129-138.
- [26] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J]. 环境科学, 2007(6): 1305-1310.
- [27] 魏建林, 谭德水, 郑福丽, 等. 养分专家系统推荐施肥对小麦玉米产量、效益及养分平衡的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(2): 87-92.

Effects of nutrient expert system recommended fertilization on cotton yield, nutrient uptake, utilization and balance in Xinjiang

FAN Lin-xin^{1, 2}, Halihashi · Ibat¹, LI Chuan-long³, Aini · Mai-maiti⁴, DU You-ping⁵, ZHANG Yan^{1*}

(1. Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Desert Oasis Crop Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi Xinjiang 830091; 2. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052; 3. Changji Agricultural Extension Center, Changji Xinjiang 831199; 4. Bachu County Agricultural Extension Center, Bachu Xinjiang 843899; 5. Shawan Agricultural Extension Center, Shawan Xinjiang 832104)

Abstract: In order to verify the applicability of cotton nutrient expert system recommended fertilization in southern and northern Xinjiang, the effects of nutrient expert recommended fertilization on cotton yield, economic benefit, nutrient absorption and fertilizer utilization rate were studied. Field trials were conducted in Shawan, Changji and Bachu in Xinjiang in 2020, with 6 treatments for each experiment: recommended fertilization based on nutrient expert system (NE), farmers conventional fertilization (FP), formulated fertilization based on soil testing or recommended fertilization by the local agricultural technology extension department (ST), no nitrogen fertilizer applied on the basis of NE recommendation (NE-N), no phosphate fertilizer applied on the basis of NE recommendation (NE-P), no potassium fertilizer applied on the basis of NE recommendation (NE-K). The results showed that, in Shawan, Changji and Bachu test sites, the yield of NE treatment was higher than that of ST and FP treatment, and the yield increased by 4.71% and 6.68% in Shawan, 5.53% and 9.58% in Changji, 5.81% and 9.47% in Bachu, respectively. In the three test sites, compared with ST and FP treatment, NE increased the income by 2682.13-4027.40 and 4278.95-6895.06 yuan/hm², respectively. In Shawan, nitrogen, phosphorus and potassium utilization rates of NE treatment were significantly higher than those of ST and FP treatment, increasing by 14.65% and 9.08%, 10.93% and 15.92%, 7.26% and 8.53%, respectively. In Changji, the nitrogen utilization rate of NE treatment was significantly higher than FP treatment, increasing by 21.69%. In Changji, the utilization rate of phosphorus and potassium fertilizer NE treatment was significantly higher than that in ST and FP treatment, increasing by 29.38% and 34.60%, 32.16% and 40.37%, respectively. In Bachu, the utilization rates of nitrogen and phosphorus fertilizer NE treatment were significantly higher than those in ST and FP treatment, increasing by 12.84% and 12.02%, 16.76% and 24.21%, respectively. In Bachu, the utilization rate of potassium fertilizer NE treatment was 4.39% higher than that in FP treatment. In Shawan, compared with ST and FP treatments, the nitrogen agronomic efficiency of NE was increased by 1.98 and 2.00 kg/kg, phosphorus agricultural efficiency increased by 2.58 and 3.29 kg/kg, and potassium agronomic efficiency was increased by 1.82 and 3.74 kg/kg, respectively. In Changji, the nitrogen agronomic efficiency of NE treatment was 4.03 kg/kg higher than that of FP treatment, and NE treatment was higher than that of ST and FP treatment, phosphorus agricultural efficiency increased by 10.59, 11.81 kg/kg, and potassium agronomic efficiency was increased by 6.27 and 8.08 kg/kg. Compared with ST and FP treatments, the nitrogen agronomic efficiency of Bachu NE was increased by 2.43 and 2.51 kg/kg, phosphorus agricultural efficiency increased by 3.29 and 4.61 kg/kg, and potassium agronomic efficiency of NE was 1.89 kg/kg higher than that of FP treatment, respectively. The profit and loss rates of nitrogen, phosphorus and potassium of NE in Shawan was 27.10%, 46.82% and 59.54%, while that in Changji was 16.39%, 6.25%, 18.30% and in Bachu it was 61.04%, 48.53% and 27.81%, respectively. Nutrient expert system-cotton recommended fertilization balanced the fertilization ratio of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer, and effectively improved the nutrient absorption, fertilizer utilization and economic benefits of cotton while ensuring the yield.

Key words: nutrient expert system; cotton; recommended fertilization; nutrient absorption; fertilizer utilization rate