

基于养分专家系统的侧深施肥技术对宁夏引黄灌区 水稻产量与养分利用的影响

洪瑜¹, 李旭², 张慈娟², 王英³, 王芳¹, 刘汝亮¹

(1.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2.灵武市农业综合开发办公室,
宁夏 灵武 751400; 3.宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 为了寻求合理施用肥料与改善水稻养分利用的有效措施, 通过 2016—2018 年在宁夏引黄灌区开展的 8 组田间试验, 研究基于养分专家系统的侧深施肥技术 (NE—SD) 对水稻产量与养分利用率的影响。结果表明: 与农民习惯施肥 (FP) 处理相比, 养分专家系统 (NE) 处理在减氮 24.85%、减磷 24.78%、增钾 90.71% 的基础上, 稻谷增产 4.71%; 氮素、磷素、钾素累积量分别增加 2.24%、4.40%、15.09%; 氮肥、磷肥、钾肥利用率分别增加 9.84、8.78、1.99 个百分点; 氮肥、磷肥、钾肥农学效率分别增加 4.73、7.69、1.54 kg/kg。基于养分专家系统的侧深施肥技术, 能够深化 4R 养分管理方法, 表现出较好的应用效果。与 FP 处理相比, NE—SD 处理稻谷增产 7.53%; 氮素、磷素、钾素累积量分别增加 3.92%、7.87%、18.74%; 氮肥、磷肥、钾肥利用率分别增加 11.09、11.32、5.82 个百分点; 氮肥、磷肥、钾肥农学效率分别增加 5.87、11.31、3.54 kg/kg。因此, 在宁夏引黄灌区, NE 推荐施肥与 NE 推荐施肥的基础上, 采用侧深施肥技术 2 种施肥方法均能在减少肥料投入的基础上, 增加稻谷产量, 增加水稻养分累积量, 提高养分利用率, 降低土壤氮素、磷素盈余。

关键词: 养分专家系统; 侧深施肥技术; 水稻产量; 养分利用率; 引黄灌区

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0252-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.038

Effects of Side Deep Fertilization Technology Based on Nutrient Expert System on Rice Yield and Nutrient Utilization Efficiency in Yellow River Irrigation Region of Ningxia

HONG Yu¹, LI Xu², ZHANG Cijuan², WANG Ying³, WANG Fang¹, LIU Ruliang¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of

Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002; 2. Lingwu Agricultural Comprehensive

Development Office, Lingwu, Ningxia 751400; 3. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to explore the effective measures that could make rational fertilization and improve nutrient utilization of rice, 8 field experiments were conducted in the Yellow River irrigation region of Ningxia from 2016 to 2018 to evaluated the effect of side deep fertilization technology based on nutrient expert system (NE—SD) on rice yield and nutrient use efficiency. The results showed that, compared to the farmer practice fertilization (FP) treatment, the nutrient expert system (NE) treatment significantly reduced N and P application rate 24.85% and 24.78%, but increased K rate 90.71%, and increased the rice yield 4.71%. Compared to the FP treatment, the nutrient accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium increased 2.24%, 4.40% and 15.09%, respectively; the nutrient utilization efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium increased 9.84, 8.78 and 1.99, respectively; the fertilizer agronomic efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium increased 4.73, 7.69 and 1.54 kg/kg, respectively. The side deep fertilization technology based on nutrient expert system could deepen the 4R nutrient management principle and had better application effect. Compared to the FP treatment, the rice yield of the NE—SD treatment increased 7.53%. Compared to the FP treatment, the nutrient accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium increased 3.92%, 7.87% and 18.74%,

收稿日期: 2019-10-29

资助项目: 宁夏重点研发计划项目 (2019BBF02026); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200107); 宁夏自然科学基金项目 (2018AAC03281); 宁夏农林科学院农业科技自主创新专项 (NNKZZCGZH-2019-10 DW-X-2018008)

第一作者: 洪瑜 (1980—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事农业环境研究。E-mail: ouxuer333@163.com

通信作者: 王芳 (1968—), 女, 硕士, 研究员, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: berrywang@vip.sina.com

respectively; the nutrient utilization efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium increased 11.09, 11.32 and 5.82, respectively; the fertilizer agronomic efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium increased 5.87, 11.31 and 3.54 kg/kg, respectively. Therefore, on the basis of reducing fertilizer rate, two fertilization methods of the nutrient expert system and the side deep fertilization technology based on nutrient expert system could increase rice yield and nutrient accumulation, improve nutrient utilization efficiency, and reduce soil nitrogen and phosphorus surplus in Yellow River irrigation region of Ningxia.

Keywords: nutrient expert system; side deep fertilization technology; rice yield; nutrient utilization efficiency; Yellow River irrigation region

民为国基,谷为民命。我国种植面积最大、产量最高的主要粮食作物是水稻,2017 年我国稻谷种植面积达到 0.31 亿 hm^2 ,产量达到 6 916.9 kg/hm^2 ,稻谷在全国居民口粮消费结构中占据 65%左右。水稻安全生产的稳步发展对深入实施国家粮食安全战略和乡村振兴战略具有十分重要的意义^[1]。然而水稻生产过程中,农民盲目过量及不合理施用化肥导致了肥料利用率低、资源浪费与环境污染。因此,如何提高肥料养分利用率,减少肥料损失与环境污染是我国农业清洁生产及可持续发展面临的严峻挑战。

养分专家系统(Nutrient Expert,以下简称 NE)是由国际植物营养研究所(IPNI)结合 4R 养分管理方法(选择正确的肥料品种(Right source)、采用正确的肥料用量(Right rate)、在正确的施肥时间(Right time)施用在正确的位置(Right place),是被普遍采用的肥料最佳养分管理新方法)提出的一种基于产量反应和农学效率进行推荐施肥和养分管理方法^[2]。NE 系统是一个基于电脑操作的决策支持系统,它能结合目标产量、土壤性质、气候条件及养分管理措施等作物生产相关信息,让当地农技专家快速得出施肥量并规划出肥料施用的指导方针,既适合指导农户,也适合大面积区域推荐施肥^[3]。目前该技术已经应用在玉米^[4]、小麦^[5]、水稻^[6]、马铃薯^[7]等多种作物,在保持土壤微生物多样性的同时,提高了作物产量与肥料利用率,是一种可持续的推荐施肥方式^[8-10]。侧深施肥技术(side deep fertilization,以下简称 SD)是日本从 20 世纪 90 年代开始应用于水稻生产的环保型施肥技术,在水稻插秧时将缓控释肥料一次性集中施于秧苗一侧 5~8 cm 深处的施肥方法,这种施肥方法的优点是可将肥料呈条状集中而不分散,形成一个贮肥库逐渐释放供给水稻生育需求^[11]。目前已经成为我国农业农村部确定的 2018 年十项重大引领性农业技术之一。该技术在我国很多地区得到了应用推广,实现了农机农艺的高度融合,通过结合缓/控释肥料可实现生育期一次全量施肥,降低了生产成本,是一种资源节约和环境友好的施肥技术^[12-13]。

但是,侧深施肥技术在实际应用时,针对适宜当

地的缓控释肥料推荐施用量需要进行大量的试验研究,如果过量会引发水稻后期贪青倒伏影响产量与品质,而用量不足时会影响水稻前期有效分蘖,减少有效穗数,进而影响产量^[12,14]。如果在 NE 推荐施肥的基础上采用侧深施肥技术,既能快速获得当地适宜施肥方案,又能提高农业机械水平,易于应用推广,对农业资源高效利用与水稻清洁可持续生产具有重要的意义。本研究以农民习惯施肥为对照,研究 NE 推荐施肥与 NE 基础上的侧深施肥技术对水稻产量与养分累积利用的影响,旨在为宁夏引黄灌区水稻清洁高效可持续生产提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于宁夏引黄灌区,地处中温带干旱气候区,年均蒸发量 1 100~1 600 mm,年均降水量 180~200 mm,年均气温 8~9 $^{\circ}\text{C}$,作物生长季节 4~9 月, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 3 200~3 400 $^{\circ}\text{C}$,太阳辐射达 619.5 $\times 10^4 \text{ kJ}/\text{m}^2$,年均日照时间 2 800~3 100 h,无霜期 140~165 天。

本研究于 2016—2018 年在青铜峡市叶盛镇($n=3$)、灵武市梧桐树乡($n=3$)和永宁县望洪镇($n=2$)进行,共计 8 组试验,土壤类型均为灌淤土。不同试验点的土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

所有田间试验均设 6 个施肥处理,包括:农民习惯施肥(FP)、养分专家系统推荐施肥(NE)、在 NE 基础上不施氮肥(NE-N)、在 NE 基础上不施磷肥(NE-P)、在 NE 基础上不施钾肥(NE-K)和在 NE 基础上采用侧深施肥技术(NE-SD)。NE 处理施肥量是在调查当地上 1 年土壤养分、作物、施肥量与产量情况的基础上,利用水稻 NE 养分专家系统计算获得。

试验所用肥料:氮肥用尿素(N,46%),磷肥用重过磷酸钙(P_2O_5 ,46%),钾肥用氯化钾(K_2O ,60%),控释氮肥(N46%,控释尿素 60%,普通尿素 40%),由宁夏农林科学院农业资源与环境研究所自主研制,委托山东烟农太阳肥业有限公司生产。FP 处理氮肥分 3 次施用,基肥:分蘖肥:穗肥为 50%:25%:25%,磷钾肥作为基

肥一次施入;NE 处理遵循水稻养分专家系统推荐施肥运筹,氮肥分 3 次施用,基肥:分蘖肥:穗肥为 50%:30%:20%,钾肥分 2 次施用,基肥:穗肥为 60%:40%,磷肥作为基肥一次施入;NE—SD 处理采用侧深施肥插秧机在插秧时将全部控释氮肥、磷钾肥料施在水稻一侧 5 cm 处,施肥深度为 3~5 cm(表 2)。

表 1 不同试验点土壤基本理化性质

试验点	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
永宁—1	8.29	10.1	0.52	22.1	13.2	104
永宁—2	8.25	13.7	0.80	17.5	14.8	117
灵武—3	8.30	15.9	0.86	70.5	27.9	128
灵武—4	8.28	17.3	0.98	65.8	14.8	113
灵武—5	8.32	10.0	0.59	50.3	21.5	116
青铜峡—6	8.26	15.3	0.89	70.4	31.9	156
青铜峡—7	8.18	17.9	1.00	77.2	23.1	141
青铜峡—8	8.16	18.7	1.02	89.7	20.3	137

表 2 不同处理施肥量 单位:kg/hm²

试验点	NE 施肥量			FP 施肥量		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
永宁—1	198	60	120	285	75	45
永宁—2	205	64	102	285	75	45
灵武—3	195	75	116	270	90	60
灵武—4	205	80	127	270	90	60
灵武—5	199	61	122	270	90	60
青铜峡—6	201	43	102	255	90	75
青铜峡—7	201	67	124	255	90	75
青铜峡—8	208	69	131	255	90	75
均值	202	65	118	268	86	62

试验小区面积 60 m²,重复 3 次,随机区组排列。水稻插秧株行距为 12 cm×30 cm,插秧时每穴 3~5 株。试验于每年 4—10 月进行,供试水稻品种为当地主栽品种“宁粳 43 号”和“宁粳 50 号”,于 4 月下旬育秧,5 月中旬施基肥整地,5 月下旬插秧,6 月上旬追施蘖肥,7 月上旬追施穗肥,9 月下旬收获。

1.3 样品采集与分析

田间试验整地前,按照“S”形多点混合采集耕作层 0—20 cm 土样,风干、研磨过筛。土壤 pH 用水浸提电位法(水土比为 5:1);有机质含量采用重铬酸钾—外加热法;全氮采用凯氏定氮法;碱解氮含量采用碱解扩散法;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾含量采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定^[15]。

在水稻成熟期采集植株样品,每小区采集 1 m² 的水稻植株样品,70 ℃杀青 20 min,105 ℃烘干,测定植株和籽粒全氮、全磷、全钾含量,全氮采用凯氏定氮法;全磷采用钒钼黄比色法,全钾采用火焰光度计法。

计算水稻的秸秆生物量、籽粒产量和氮磷钾肥养分利用率。在水稻收获时,每个小区实打实收计算水稻产量,采集植株样品考种,测定株高、穗长、穗粒数

及千粒重等指标。

1.4 数据处理与统计分析

养分累积量(kg/hm²)=收获物干质量×收获物养分含量+非收获物干质量×非收获物养分含量

养分利用率(NUE,%)=(施肥处理地上部植株养分累积量—不施肥处理地上部植株养分累积量)/施肥量×100%

农学效率(AEN,kg/kg)=(施肥区作物产量—不施肥区作物产量)/施肥量

养分表观平衡(kg/hm²)=养分投入量—地上部植株养分累积量

采用 Excel 和 SPSS 软件进行数据处理和统计分析,并采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻产量以及构成因素的影响

从图 1 可以看出,不同试验点各施氮处理与 NE—N 处理的水稻产量之间存在显著性差异($p<0.05$),各处理产量大小顺序均表现为:NE—SD>NE>FP>NE—K>NE—P>NE—N。汇总 8 组试验结果显示,各施氮处理水稻产量均显著提高,NE—SD 处理产量最高,比 FP 处理增产 7.53%;其次为 NE 处理,比 FP 处理增产 4.71%,但是差异不显著。

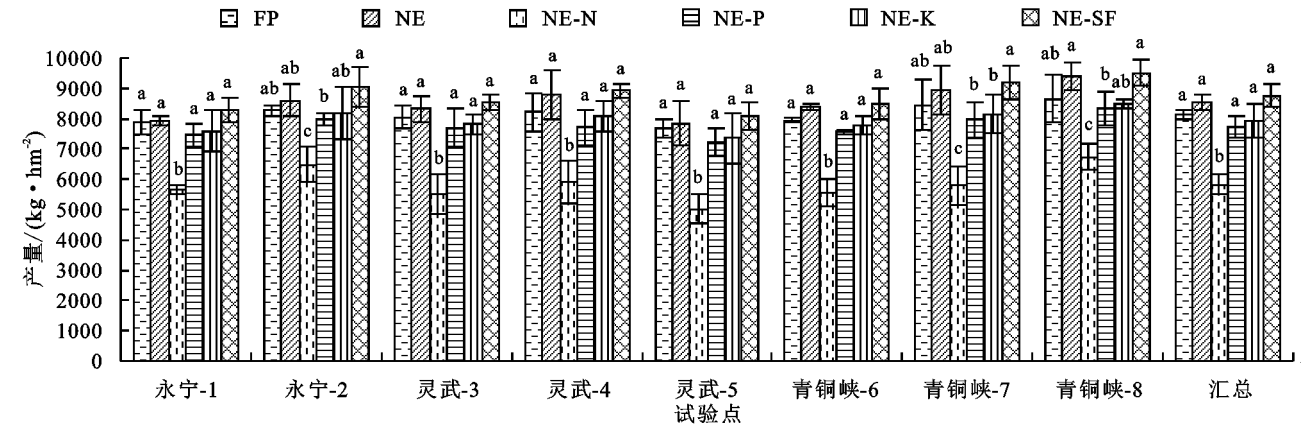
不同试验点的水稻产量存在差异,青铜峡—8 试验点 NE—SD、NE 处理产量最高,分别比 FP 处理增产 9.73%和 8.59%;其次为青铜峡—7 试验点产量较高,NE—SD、NE 处理分别比 FP 处理增产 8.52%和 5.64%;灵武—5 试验点 NE—SD、NE 处理产量最低,分别比 FP 处理增产 5.19%和 2.16%。

2.2 不同施肥处理对水稻养分累积量的影响

由表 3 可知,汇总 8 组试验结果显示,NE—SD、NE、FP 处理与缺素处理的水稻氮素累积量之间存在显著性差异($p<0.05$),NE—SD、NE、FP、NE—K 处理与 NE—N、NE—P 处理的水稻磷素累积量之间存

在显著性差异($p<0.05$),NE—SD、NE 处理与其他处理的水稻钾素累积量之间存在显著性差异($p<0.05$)。NE—SD 处理水稻养分累积量均最高,氮素、磷

素、钾素分别比 FP 处理增加 3.92%,7.87%,18.74%;其次为 NE 处理,氮素、磷素、钾素分别比 FP 处理增加 2.24%,4.40%,15.09%。



注:不同字母表示各指标在不同处理之间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同试验点各处理的水稻产量

不同试验点的水稻养分累积量存在差异,磷素累积量差异较小。青铜峡—8 试验点 NE—SD 处理氮素、钾素累积量最高,分别比 FP 处理增加 3.95%和 20.47%;灵武—3 试验点 NE—SD 处理磷素累积量最高,比FP 处理增加 8.71%。

青铜峡—8 试验点 NE 处理氮素、钾素累积量最高,分别比 FP 处理增加 2.82%和 16.83%;灵武—4 试验点 NE 处理磷素累积量最高,比 FP 处理增加 9.43%。灵武—5 试验点 NE—SD、NE 处理氮素、磷素和钾素累积量均最低。

表 3 不同试验点各处理的水稻养分累积量

					单位:kg/hm ²				
试验点	处理	氮素	磷素	钾素	试验点	处理	氮素	磷素	钾素
永宁—1	FP	145.23a	43.13a	114.78ab	青铜峡—6	FP	143.21a	45.22a	121.76ab
	NE	145.56a	43.14a	132.12a		NE	145.75a	46.41a	131.38a
	NE—N	81.31b	29.51b	103.85b		NE—N	77.25b	37.37b	107.41bc
	NE—P	87.41b	28.92b	110.05b		NE—P	109.51ab	29.10b	110.69bc
	NE—K	100.88ab	36.90ab	103.69b		NE—K	103.80ab	42.24ab	99.14c
	NE—SD	149.96a	45.81a	135.84a		NE—SD	147.69a	48.23a	135.67a
永宁—2	FP	149.15ab	46.50a	123.81b	青铜峡—7	FP	155.10ab	46.20a	134.37b
	NE	158.09a	47.63a	143.86a		NE	163.83a	48.32a	154.48a
	NE—N	87.21c	33.86b	111.28b		NE—N	84.28c	34.82b	114.45c
	NE—P	89.52c	33.59b	118.81b		NE—P	88.41c	32.76b	118.98bc
	NE—K	102.43bc	39.88ab	109.79b		NE—K	111.70bc	39.82b	110.22c
	NE—SD	163.24a	48.35a	149.12a		NE—SD	164.67a	50.63a	156.02a
灵武—3	FP	147.27a	47.53a	114.43ab	青铜峡—8	FP	161.94a	42.34ab	133.87b
	NE	145.02a	49.87a	130.33a		NE	166.50a	44.79ab	156.41a
	NE—N	75.10b	35.89b	107.13b		NE—N	87.28b	39.65b	113.80c
	NE—P	114.73ab	31.52b	108.93b		NE—P	91.28b	34.08b	119.24bc
	NE—K	100.27ab	38.41b	99.26b		NE—K	118.61ab	49.81a	111.11c
	NE—SD	148.76a	51.67a	138.69a		NE—SD	168.33a	46.38a	161.28a
灵武—4	FP	148.50a	46.28a	120.81b	汇总	FP	148.89a	44.64a	121.82b
	NE	152.16a	50.65a	143.07a		NE	152.22a	46.60a	140.21a
	NE—N	85.99b	39.75ab	111.90b		NE—N	81.67b	35.93b	108.74c
	NE—P	91.34b	31.80b	115.81b		NE—P	96.69b	31.25b	113.44bc
	NE—K	109.13ab	37.67b	101.31b		NE—K	105.98b	40.68ab	103.85c
	NE—SD	152.17a	50.79a	147.83a		NE—SD	154.72a	48.15a	144.66a
灵武—5	FP	140.69a	39.91ab	110.76b					
	NE	140.83a	42.02a	130.03a					
	NE—N	74.97b	36.62ab	100.07b					
	NE—P	101.32ab	28.26b	105.03b					
	NE—K	101.01ab	40.71a	96.31b					
	NE—SD	142.95a	43.35a	132.81a					

注:同列不同字母表示各指标在不同处理之间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.3 不同施肥处理对水稻养分利用率的影响

由表 4 可知,汇总 8 组试验结果显示,NE—SD、NE 处理与 FP 处理的水稻氮肥利用率、磷肥农学效率之间均存在显著性差异($p<0.05$),NE—SD 处理与 FP 处理的水稻磷肥利用率之间存在显著性差异($p<0.05$),其他各处理的水稻养分利用率与农学效率均差异不显著。NE—SD 处理水稻养分利用率均最高,氮肥、磷肥、钾肥分别比 FP 处理增加 11.09, 11.32,5.82 个百分点;其次为 NE 处理,氮肥、磷肥、钾肥分别比 FP 处理增加 9.84,8.78,1.99 个百分点。NE—SD 处理水稻农学效率均最高,氮肥、磷肥、钾肥分别比 FP 处理增加 5.87,11.31,3.54 kg/kg;其次为 NE 处理,氮肥、磷肥、钾肥分别比 FP 处理增加 4.73, 7.69,1.54 kg/kg。

不同试验点 NE—SD、NE 处理与 FP 处理的水稻氮

肥利用率之间大体表现出显著性差异($p<0.05$)。青铜峡—7 试验点 NE—SD、NE 处理氮肥利用率最高,分别比 FP 处理增加 12.22,11.80 个百分点;青铜峡—6 试验点 NE—SD、NE 处理磷肥利用率最高,比 FP 处理增加 26.57,22.34 个百分点;永宁—2 试验点 NE—SD 处理钾肥利用率最高,比 FP 处理增加 7.41 个百分点;青铜峡—7 试验点 NE 处理钾肥利用率最高,比 FP 处理增加 3.50 个百分点。

青铜峡—7 试验点 NE—SD、NE 处理氮肥农学效率最高,分别比 FP 处理增加 6.39,5.18 kg/kg;青铜峡—6 试验点 NE—SD、NE 处理磷肥农学效率最高,比 FP 处理增加 17.55,14.88 kg/kg;永宁—2 试验点 NE—SD 处理钾肥农学效率最高,比 FP 处理增加 6.92 kg/kg;青铜峡—8 试验点 NE 处理钾肥农学效率最高,比 FP 处理增加 4.78 kg/kg。

表 4 不同试验点各处理的水稻养分利用率和养分表观平衡

试验点	处理	肥料利用率/%			农学效率/(kg·kg ⁻¹)			养分表观平衡/(kg·hm ⁻²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
永宁—1	FP	22.43b	18.94b	24.65a	7.79a	5.57a	6.26a	139.77a	31.87a	-69.78b
	NE	32.45a	23.69ab	23.69a	11.47a	7.82a	2.77a	52.44b	16.86b	-12.12a
	NE—SD	34.67a	28.15a	26.80a	13.26a	13.72a	5.73a	48.04b	14.19b	-15.84a
永宁—2	FP	21.73b	17.21a	31.15a	6.22a	3.85b	1.64a	135.85a	28.50a	-78.81b
	NE	34.58a	21.94a	33.40a	10.35a	9.94ab	4.13a	46.91b	16.37b	-41.86a
	NE—SD	37.09a	23.07a	38.56a	12.55a	17.00a	8.56a	41.76b	15.65b	-47.12a
灵武—3	FP	26.73b	17.79a	25.28a	9.40a	3.86a	3.97a	122.73a	42.47a	-54.43b
	NE	35.86ab	24.46a	26.79a	14.45a	8.37a	4.47a	49.98b	25.13b	-14.33a
	NE—SD	37.77a	26.86a	33.99a	15.50a	11.09a	6.23a	46.24b	23.33b	-22.69a
灵武—4	FP	23.15a	16.10a	32.49a	8.55a	5.56b	1.91a	121.50a	43.72a	-60.81b
	NE	32.28a	23.56a	32.88a	14.03a	13.33ab	5.37a	52.84b	29.35b	-16.07a
	NE—SD	32.28a	23.74a	36.63a	14.70a	15.07a	6.46a	52.83b	29.21b	-20.83a
灵武—5	FP	24.34b	12.94b	24.08a	9.80a	4.99a	5.29a	129.31a	50.09a	-50.76b
	NE	33.10ab	22.56a	27.64a	14.13a	10.08a	3.96a	58.17b	18.98b	-8.03a
	NE—SD	34.16a	24.73a	29.91a	15.30a	13.89a	5.86a	56.05b	17.65b	-10.81a
青铜峡—6	FP	25.86b	17.90b	30.16a	9.40a	4.36b	2.12a	111.79a	44.78a	-46.76b
	NE	34.08a	40.24a	31.61a	14.09a	19.24a	5.82a	55.25b	-3.41b	-29.38a
	NE—SD	35.04a	44.47a	35.81a	14.66a	21.91a	6.94a	53.31b	-5.23b	-33.67a
青铜峡—7	FP	27.77b	14.93b	32.20a	10.43a	5.54b	4.14a	99.90a	43.80a	-59.37b
	NE	39.57a	23.23ab	35.69a	15.61a	14.57ab	6.35a	37.17b	18.68b	-30.48a
	NE—SD	39.99a	26.67a	36.93a	16.82a	18.21a	8.32a	36.33b	16.37b	-32.02a
青铜峡—8	FP	29.28a	9.18a	30.36a	7.57a	3.67b	2.10a	93.06a	47.66a	-58.87b
	NE	38.09a	15.52a	34.58a	12.85a	15.56a	6.88a	41.50b	24.21b	-25.41a
	NE—SD	38.97a	17.83a	38.30a	13.33a	17.00a	7.63a	39.67b	22.62b	-30.28a
汇总	FP	25.16b	15.62b	28.80a	8.65a	4.67b	3.43a	119.24a	41.61a	-59.95b
	NE	35.00a	24.40ab	30.78a	13.37a	12.36a	4.97a	49.28b	18.27b	-22.21a
	NE—SD	36.25a	26.94a	34.62a	14.51a	15.98a	6.97a	46.78b	16.72b	-26.66a

2.4 不同施肥处理对土壤养分表观平衡的影响

由表 4 可知,汇总 8 组试验结果显示,NE—SD、NE 处理与 FP 处理的土壤养分表观平衡之间存在显著性差异($p<0.05$)。各处理的土壤氮素总体上均有大幅盈余,NE—SD、NE 处理显著低于 FP 处理,降幅分别达 60.77%,58.67%;土壤磷素总体上为小幅盈余,NE—SD、

NE 处理显著低于 FP 处理,降幅分别达 59.81%, 56.09%;土壤钾素总体上为大幅亏缺,NE—SD、NE 处理显著高于 FP 处理,增幅分别达 55.53%,62.95%。

不同试验点的土壤养分表观平衡与汇总结果表现一致,土壤氮素均有大幅盈余,土壤磷素均有小幅盈余,土壤钾素均有大幅亏缺。青铜峡—7 试验点

NE—SD、NE 处理土壤氮素盈余量最低,分别比 FP 处理减少 63.57, 62.73 kg/hm²;青铜峡—6 试验点 NE—SD、NE 处理磷素基本持平,比 FP 处理减少了 50.01, 48.19 kg/hm²;灵武—5 试验点 NE—SD、NE 处理钾素亏缺量最低,比 FP 处理增加 39.96, 42.73 kg/hm²。究其原因,主要由于当地水稻生产时,长期大量施用氮肥、磷肥,少施或者不施钾肥。

3 讨论

3.1 养分专家系统对水稻产量与养分利用率的影响

养分专家系统(NE)是基于土壤基础养分供应特征、作物农学效率与产量反应,采用 4R 养分管理原则,能在施肥推荐中选择合适的肥料品种和适宜的用量,并在合适的施肥时间施在恰当的位置^[2]。汇总 8 组试验结果表明,与 FP 处理相比,NE 处理在减施氮肥 24.85%、减施磷肥 24.78%、增施钾肥 90.71%的基础上,稻谷增产 4.71%,差异不显著;氮素、磷素、钾素累积量分别增加 2.24%, 4.40%, 15.09%,其中钾素累积量差异显著;氮肥、磷肥、钾肥利用率分别增加 9.84, 8.78, 1.99 个百分点,其中氮肥利用率差异显著;氮肥、磷肥、钾肥农学效率分别增加 4.73, 7.69, 1.54 kg/kg,其中磷肥农学效率差异显著。NE 推荐施肥方案减少氮、磷肥用量,增加钾肥用量;在关键生育期(孕穗期),增加了 1 次追施钾肥,因此优化肥料运筹,均衡农田养分供应,促进水稻关键生育期的养分吸收累积,提高了稻谷产量和养分利用率^[16]。钾是植物生长发育所必须的大量元素,有重要的营养和生理作用,对水稻体内碳水化合物的形成、多种酶的活化、光合产物积累等植株生理生化过程有着明显地促进作用,适宜的施钾量可以提高水稻养分吸收利用效率,增加水稻产量^[17]。

刘奕等^[18]研究表明,NE 推荐施肥方法在吉林省中部一季稻区均有减肥、稳产、增效的良好效果,在半湿润地区、半干旱地区适用性均较好;刘东海等^[19]研究表明,NE 推荐施肥促进了水稻对氮、磷、钾养分的吸收和利用,中稻增产 1.4%~6.9%,氮肥利用效率也高于全国平均水平,可在湖北中稻种植区推广应用;柳开楼等^[20]研究表明,与农民习惯施肥相比,NE 系统下双季稻产量增加 14.33%~32.74%,提高了早、晚稻的养分吸收量和偏生产力,NE 系统可以在江西双季稻实现化肥减施增效的目标。均与本研究结果一致。

3.2 基于养分专家系统的侧深施肥技术对水稻产量与养分利用率的影响

基于养分专家系统的侧深施肥技术,能够深化 4R 养分管理原则,应用侧深施肥机械准确地把正确的肥料施用在正确的位置上,促进肥料的高效利用。汇总 8 组

试验结果表明,与 FP 处理相比,NE—SD 处理稻谷增产 7.53%,差异不显著;氮素、磷素、钾素累积量分别增加 3.92%, 7.87%, 18.74%,其中钾素累积量差异显著;氮肥、磷肥、钾肥利用率分别增加 11.09, 11.32, 5.82 个百分点,其中氮肥、磷肥利用率差异显著;氮肥、磷肥、钾肥农学效率分别增加 5.87, 11.31, 3.54 kg/kg,其中磷肥农学效率差异显著。侧深施肥提高了水稻群体的高效叶面积指数和有效颖花数量,促进了光合产物合理分配与干物质积累及运转,提高了氮素积累吸收及利用率,增加了产量与效益^[14]。

张爱平等^[11]研究表明,基于缓释肥的侧条施肥技术在减少氮素投入的基础上,籽粒产量没有降低,提高了氮素回收率,从源头上控制了氮素流失的风险。刘汝亮等^[21]研究表明,侧条施肥技术能保证稻谷产量,显著提高水稻地上部吸氮量和氮肥偏生产力,降低了氮素的表现损失量;段然等^[13]研究表明,控释肥侧条施用可有效提高湖南双季稻区水稻的产量和氮肥利用率,减少面源流失;钟雪梅等^[22]研究表明,侧深施肥能有效减少稻田氮肥施入,利于 N、P、K 吸收积累,同步提高湖南双季稻的产量和氮肥利用效率。

3.3 不同试验点养分专家系统对水稻产量与养分利用率的影响

本研究由于应用了 NE 推荐施肥系统,不需要大量耗时繁琐的试验处理,就能够针对当地具体田块推荐适宜施肥量,而且每年都会根据上一季的产量反应、养分残效、秸秆还田等信息进行调整和优化,较好地达到节肥稳产、提高养分利用率的目标。不同试验点 NE 推荐施肥对水稻产量与养分利用率存在差异,大体表现为青铜峡市较高,其次为永宁县,灵武市较低。青铜峡—8 试验点的产量和氮素累积量相对最高,其次为青铜峡—7 试验点,灵武—5 试验点的产量和氮素累积量相对最低,究其原因主要是青铜峡基础地力相对较高,而灵武基础地力相对较低,高基础地力可以提高水稻产量和对土壤养分的吸收量^[23]。但是青铜峡—7 试验点的氮肥利用率、氮肥农学效率相对最高,氮素盈余量最低,其次为青铜峡—8 试验点,主要由于高基础地力会降低肥料的利用效率^[23],因此肥料投入不宜过大。

4 结论

在宁夏引黄灌区,NE 推荐施肥与 NE 推荐施肥的基础上采用侧深施肥技术 2 种施肥方法均能在减少肥料的基础上,增加稻谷产量,增加水稻养分累积量,提高养分利用率,降低土壤氮素、磷素盈余。在 NE 推荐施肥的基础上采用侧深施肥技术应用效果

较好,但是需要因地制宜选择合适释放率和释放期的缓/控释肥料,因此,缓/控释肥料的筛选还有待于深入研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室.中国的粮食安全[N].人民日报,2019-10-15(010).
- [2] 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.
- [3] 徐新朋.基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [4] 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.
- [5] Chuan L M, He P, Pampolino M F, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency [J].Field Crops Research,2013,140:1-8.
- [6] 刘奕.水稻养分专家系统在吉林省中部稻区的应用与优化研究[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [7] 梁俊梅,张君,安昊,等.养分专家系统推荐施肥对马铃薯产量及肥料利用率的影响[J].作物杂志,2019(4):133-138.
- [8] Xu X P, He P, Pampolino M F, et al .Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. Field Crops Research, 2014,157:27-34.
- [9] 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.
- [10] Ullah S, Ai C, Ding W C, et al. The response of soil fungal diversity and community composition to long-term fertilization[J].Applied Soil Ecology,2019,140:35-41.
- [11] 张爱平,刘汝亮,杨世琦,等.基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):555-562.
- [12] 刘汝亮,王芳,王开军,等.控释氮肥侧条施用对东北地区水稻产量和氮肥损失的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):252-256.
- [13] 段然,汤月丰,王亚男,等.不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1815-1822.
- [14] 韩雪松.侧深施肥下施肥量和密度对水稻产量形成的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [16] Yang F, Xu X, Ma J, et al. Experimental validation of a new approach for rice fertilizer recommendations across smallholder farms in China[J].Soil Research, 2017,55(6):579-589.
- [17] 辛柳.施钾量对寒地粳稻碳水化合物形成积累和产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
- [18] 刘奕,王寅,李春林,等.吉林省中部一季稻区推荐施肥方法研究[J].水土保持学报,2018,32(4):273-278.
- [19] 刘东海,陈云峰,李双来,等.养分专家系统推荐施肥对湖北中稻产量和养分利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2019(4):84-88.
- [20] 柳开楼,李大明,胡志华,等.养分专家系统在双季稻中的应用和评价[J].中国土壤与肥料,2019(1):184-189.
- [21] 刘汝亮,李友宏,王芳,等.缓释肥侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响[J].农业资源与环境学报,2014,31(1):45-49.
- [22] 钟雪梅,黄铁平,彭建伟,等.机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响[J].中国水稻科学,2019,33(5):436-446.
- [23] 梁涛,廖敦秀,陈新平,等.重庆稻田基础地力水平对水稻养分利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(16):3106-3116.
- [24] 屈会娟,李金才,沈学善,等.种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响[J].作物学报,2009,35(1):124-131.
- [25] 张明明,董宝娣,乔匀周,等.播期、播量对旱作小麦‘小偃 60’生长发育、产量及水分利用的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(8):1095-1102.
- [26] 张晓,江伟,李曼.不同年份下播种密度对扬麦 13 群体动态和产量性状的影响[J].金陵科技学院学报,2017,33(1):60-63.
- [27] 刘丽平,胡焕焕,李瑞奇,等.行距配置和密度对冬小麦品种河农 822 群体质量及产量的影响[J].华北农学报,2008,23(2):125-131.
- [28] 王立明.播种密度对旱地不同类型冬小麦产量和水分利用效率的影响[J].作物品种资源,2010(3):41-43.
- [29] 刘文国,张建昌,曹卫贤,等.旱地小麦不同栽培条件对土壤水分利用效率的影响[J].西北农业学报,2006,15(5):47-51.
- [30] 贾秀领,蹇家利.高产冬小麦水分利用效率及其组分特征分析[J].作物学报,1999,25(3):309-314.
- [31] 邓西平,山仑,稻永忍,等.密度、施肥对旱地春小麦产量、水分利用效率和籽粒养分含量的补偿效应[J].西北植物学报,2003,23(11):1861-1870.

(上接第 251 页)