

施肥对小麦/玉米带田养分吸收及土壤硝态氮累积的影响

汤莹, 杨君林, 崔云玲, 赵建华

(甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 小麦与玉米间作是西北干旱灌区常见的高产栽培模式, 为了给小麦/玉米带田高效施肥提供科学依据, 通过在干旱灌区进行的小麦/玉米带田田间试验, 研究了不同施肥模式对小麦/玉米带田产量、养分吸收及土壤硝态氮累积的影响。结果表明, 以有机肥与化肥配施、养分均衡供给与合理运筹为核心的优化施肥模式(施有机肥 22.5 t/hm²、N 300 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm², 有机肥、全部磷钾肥及 20% 的氮肥做底肥, 80% 的氮肥在小麦三叶期追施 10%、小麦挑旗期追施 20%、玉米喇叭口期追施 30%、玉米灌浆中期追施 20%) 促进了间作体系作物植株对氮、磷、钾等养分的吸收, 相对于增量施肥模式, 优化施肥模式的氮肥偏生产力和氮肥农学效率分别提高了 38.8% 和 36.9%, 氮肥利用效率增加了 14 个百分点, 0~120 cm 土层土壤硝态氮累积量减少 43.9%~58.0%, 小麦产量达 5 358 kg/hm², 玉米产量达 12 453 kg/hm²。

关键词: 施肥模式; 小麦/玉米带田; 产量; 养分吸收; 硝态氮; 积累

中图分类号: S344.3; S158.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2022)01-0083-05

[doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2022.01.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-2172.2022.01.016)

Effects of Fertilization on Nutrients Uptake and Soil Nitrate Nitrogen Accumulation for Wheat and Maize Intercropping

TANG Ying, YANG Junlin, CUI Yunling, ZHAO Jianhua

(Institute of Soil and Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Wheat and maize intercropping is a commonly used high yield cultivation model in the irrigated area of the northwest arid region. To provide reference for efficient fertilization in the intercropped wheat and maize fields, through field experiment carried out on the intercropped wheat and maize fields in the irrigated area of arid region, effects of different fertilization models on yield, nutrients uptake and soil nitrate nitrogen accumulation in intercropped wheat and maize fields were studied. Results showed that optimized fertilization model, using organic fertilizer and chemical fertilizer with the concept of balanced nutrient supply and rational application as the core (organic fertilizer, N, P₂O₅ and K₂O applied at 22.5 t/ha, 300 kg/ha, 120 kg/ha and 120 kg/ha, respectively with base fertilizer consisting of all the organic fertilizer plus all the phosphorus and potassium fertilizers plus 20% of nitrogenous fertilizer, 10% of the nitrogenous fertilizer dressed at the wheat trefoil stage, 20% of the nitrogenous fertilizer dressed at the wheat flag leaf elongating stage, 30% of the nitrogenous fertilizer dressed at the maize bell stage, and the last 20% of the nitrogenous fertilizer dressed in the middle of corn filling stage), promoted the uptakes of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in the intercropping system. When compared with the incremental fertilization model, nitrogen partial factor productivity and nitrogen agronomic efficiency were 38.8% and 36.9% higher, respectively, nitrogen use efficiency were increased by 14 percentage, nitrate nitrogen accumulation at the soil depth of 0 to 120 cm were decreased by 43.9% to 58.0%, wheat yield was 5 358 kg/ha, and maize yield was 12 453 kg/hain the optimized fertilization model.

Key words: Cultivation models; Intercropped wheat and maize field; Yield; Nutrient uptake; Nitrate nitrogen; Accumulation

小麦与玉米间作是西北干旱灌区常见的作物高产栽培模式, 对粮食生产发挥了重要作用。如在甘肃河西走廊、宁夏和内蒙古河套平原, 利用该种植方式单位面积作物产量大幅度增加^[1]。在

带田体系中增加单位面积养分投入是保证高产的关键, 而增施化肥是确保养分供应的主要方式, 但随着人们对化肥增产作用的认识, 又出现了过分依赖和超量施肥(主要指氮肥)的倾向, 导致肥

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(32060261)。

作者简介: 汤莹(1974—), 男, 甘肃临夏人, 副研究员, 主要从事耕作栽培及养分资源利用方面的研究工作。Email: 344413975@qq.com。

料利用率低, 不仅大大降低了肥料的经济效益, 而且对环境造成了污染, 严重威胁到人们的身体健康^[2]。如何在保护农田环境, 最大程度节约资源的前提下实现作物高产稳产是当前研究的热点。硝态氮是氮肥施入土壤后经过一系列转化存留于土壤环境中的一种主要氮肥形态, 在一定时期内如果不能被植物吸收利用, 便会产生淋洗损失, 造成资源浪费并污染地下水源^[3-4]。本试验在小麦与玉米间作种植下, 就不同施肥模式对作物的产量和养分吸收利用情况及土壤硝态氮累积进行了探讨, 旨在为小麦/玉米带田高效合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020—2021 年在甘肃省院农业科学院张掖节水农业试验站 (地理位置 38° 56' N、100° 26' E) 进行。当地海拔 1 570 m, 年均降水量 129 mm, 蒸发量 2 048 mm, 日照时数 3 085 h, ≥ 10 °C 积温 2 896 °C, 无霜期 153 d, 属于典型的干旱内陆河灌区^[4]。供试土壤为灌漠土, 耕层土壤含有机质 12.8 g/kg、碱解氮 93.8 mg/kg、有效磷 23.2 mg/kg、速效钾 115.3 mg/kg, pH 8.17。

1.2 供试材料

指示小麦品种为宁春 4 号, 指示玉米品种为郑单 958。供试氮肥为普通尿素 (含 N 46.4%) 和控释尿素 (含 N 43.2%), 磷肥为普通过磷酸钙 (含 P₂O₅ 12.0%), 钾肥为硫酸钾 (含 K₂O 50.0%)。

1.3 试验方法

试验共设 7 个处理, 分别是: 空白对照 (A, CK) 即不施任何肥料; 农户施肥模式 (B), 施 N 375 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm², 其中全部磷肥及 40% 氮肥做底肥, 60% 氮肥在玉米拔节期和灌浆期各追施 30%; 减量施肥模式 (C), 施 N 300 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm², 全部磷肥及 30% 氮肥做底肥, 70% 氮肥在小麦挑旗期追施 10%, 玉米拔节期和灌浆期各追施 30%; 增量施肥模式 (D), 施有机肥 22.5 t/hm²、N 420 kg/hm²、P₂O₅ 180 kg/hm², 全部磷肥和 20% 氮肥做底肥, 80% 氮肥在小麦三叶期和挑旗期分别追肥 10% 和 20%, 玉米喇叭口期和灌浆中期分别追施 30% 和 20%; 优化施肥模式 (E), 施有机肥 22.5 t/hm²、N 300 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm², 有机肥、全部磷钾肥及 20% 氮肥做底肥, 80% 氮肥在小麦三叶期和挑旗期

分别追施 10% 和 20%、玉米喇叭口期和灌浆中期分别追施 30% 和 20%; 轻简施肥模式 (F), 施 N (控释氮肥) 300 kg/hm²、有机肥 22.5 t/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm², 所有肥料均做底肥一次性施入; 垄作沟灌施肥模式 (G), 施 N (控释氮肥) 300 kg/hm²、有机肥 22.5 t/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm², 所有肥料均做底肥一次性施入。

试验采用随机区组设计, 重复 3 次, 小区面积 27.0 m² (4.5 m × 6.0 m), 小区间筑宽 50 cm 地埂。每小区 3 个带幅, 带宽 1.5 m, 其中小麦带宽 70 cm, 6 行区, 播种密度 450 万株/hm²; 玉米带宽 80 cm, 2 行区, 播种密度 8.25 万株/hm²。小麦露地种植, 玉米覆膜种植。灌溉定额均为 6 000 m³/hm², 分别在小麦三叶期、挑旗期、灌浆期和玉米吐丝期、灌浆中期进行。春小麦于每年 3 月中下旬播种, 7 月下旬收获; 玉米于 4 月中旬播种, 10 月上旬收获。

1.4 测定项目和方法

在小麦、玉米收获期分部位采集植株和籽粒样品分析全氮、全磷和全钾含量^[5-6]。收获后分小麦带和玉米带采集 0~120 cm 土层土壤样品, 每 20 cm 为 1 层, 测定土壤硝态氮含量^[7]。土收获时每小区去除 2 个边行外全区收获, 单独脱粒, 晒干后称重计产。

1.5 数据处理及分析

采用 Excel 及 SPSS 13.0 进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对小麦/玉米带田产量的影响

不同施肥模式改变了作物生长的微生态环境, 从而影响作物产量。从表 1 可以看出, 带田混合产量以处理 D 最高, 处理 E 次之, 处理 F 居第 3 位, 分别比处理 B 增产 36.2%、35.0%、27.3%。这 3 种模式间混合产量差异不显著, 但均显著高于其他处理, 产量增幅主要由带田玉米产量贡献。在处理 D 下, 尽管带田小麦产量没有显著变化, 但化肥增量和有机肥配施显著提高了带田玉米产量, 较处理 B 增产 53.5%, 说明在土壤养分供给充足时小麦/玉米带田具有较强的增产潜力。带田小麦产量对氮肥增施的响应并不明显, 但在氮肥减量的条件下, 带田小麦分别增产 19.7%、16.5%, 说明均衡的养分供给更有利于小麦产量的提升。处理 D、处理 E 和处理 F 中, 带田玉米均

表 1 不同施肥模式的小麦/玉米带田籽粒产量

处理	籽粒产量/(kg/hm ²)			较处理B增产/%		
	小麦	玉米	混合	小麦	玉米	混合
A(CK)	4 093 c	5 578 d	9 671 e	-11.0	-35.1	-26.7
B	4 598 ab	8 596 c	13 194 cd			
C	5 506 a	8 740 c	14 246 cd	19.7	1.7	8.0
D	4 777 ab	13 194 a	17 971 a	3.9	53.5	36.2
E	5 358 a	12 453 ab	17 811 ab	16.5	44.9	35.0
F	4 836 ab	11 955 ab	16 791 ab	5.2	39.1	27.3
G	4 687 ab	9 005 c	13 692 cd	1.9	4.8	3.8

表现出明显的增产趋势, 而处理 D 与处理 G 相对处理 B 增产趋势并不明显, 说明提高小麦 / 玉米带田还要在保持小麦不减产的前提下更多地挖掘玉米的增产潜力。

2.2 不同施肥模式对带田作物养分吸收利用的影响

2.2.1 不同施肥模式对带田作物收获期植株及籽粒吸氮量的影响

作物的养分吸收量是估算农田养分移出量的重要参数^[7]。从收获期带田作物不同部位的吸氮量(表2)可以看出, 不同施肥模式下带田作物对氮的吸收量表现为处理 D>处理 E>处理 F>处理 C>处理 G>处理 B>处理 A(CK)。处理 D 混合植株吸氮量和混合籽粒吸氮量均最高, 分别比处理 B 高 32.1%和 30.7%; 处理 D 带田玉米植株吸氮量和籽粒吸氮量均最高, 分别比处理 B 高 39.6%和 39.0%, 而该模式下小麦籽粒吸氮量的增加趋势不明显, 说明在间作模式下, 玉米有更强的养分竞争优势。处理 E、处理 F 尽管氮肥用量减低, 但其混合植株吸氮量和混合籽粒吸氮量均高于处理 B, 分别提高了 38.7%~40.0%和 22.5%~35.5%。说明有机肥与化肥配施和养分均衡供给可促进带田作物对氮的吸收。

表 2 不同施肥模式的带田作物植株和籽粒吸氮量

处理	吸氮量/(kg/hm ²)					
	小麦		玉米		混合	
	植株	籽粒	植株	籽粒	植株	籽粒
A(CK)	64.9	49.9	83.6	74.2	148.5	124.1
B	77.5	57.9	132.5	113.6	210.0	171.5
C	96.0	66.3	144.4	114.7	240.4	181.0
D	90.1	61.1	219.3	186.3	309.4	247.4
E	91.0	66.8	202.9	165.6	293.9	232.4
F	95.4	62.4	195.8	147.7	291.2	210.1
G	80.5	55.2	153.6	116.9	234.1	172.1

2.2.2 不同施肥模式对带田作物收获期植株及籽粒吸磷量的影响

从小麦 / 玉米带田收获期吸磷量(表3)可以看出, 空白对照的混合植株和籽粒吸磷量均最低。各处理均以处理 D 的混合植株和混合籽粒吸磷量最高, 分别比处理 B 高 48.3%和

50.8%; 其次为处理 E, 为 212.9 kg/hm² 和 191.3 kg/hm², 分别比处理 B 高 42.5%和 46.5%, 但处理 D 与处理 E 间差异不显著。说明增加化肥施用量和有机肥与化肥配施及养分的均衡供应均能促进带田作物对磷的吸收。处理 F 的混合植株与籽粒吸磷量相对处理 B 增加较多, 分别为 30.0%和 26.3%; 处理 C、处理 G 下带田作物的吸磷量均较处理 B 略有增加, 这反映出合理的施肥运筹策略也能提升带田作物植株和籽粒对磷的吸收。处理 E 带田玉米的吸磷量虽然略低于处理 D, 但其小麦吸磷量显著高于处理 D, 说明增加施肥量更利于玉米对磷的吸收, 而处理 E、处理 F 均能提高带田小麦植株和籽粒的吸磷量。

表 3 不同施肥模式的带田作物收获期植株和籽粒吸磷量

处理	吸磷量/(kg/hm ²)					
	小麦		玉米		混合	
	植株	籽粒	植株	籽粒	植株	籽粒
A(CK)	18.4	11.6	74.4	68.0	92.8	79.6
B	22.7	14.9	126.8	115.7	149.4	130.6
C	29.2	16.9	134.7	123.3	163.9	140.2
D	22.7	13.3	198.8	183.6	221.6	197.0
E	26.4	18.2	186.6	173.1	212.9	191.3
F	24.4	15.0	169.8	149.9	194.2	164.9
G	21.1	13.0	140.9	125.5	162.0	138.5

2.2.3 不同施肥模式对带田作物收获期植株及籽粒吸钾量的影响

对小麦 / 玉米带田收获期吸钾量的测定结果(表4)表明, 施肥处理的混合植株和籽粒吸钾量均高于空白对照, 说明施肥可以使土壤肥力得到改善, 带田作物的吸钾量增加, 这与陈磊等^[8]的研究基本一致。在不同施肥模式中, 采用处理 E 或处理 F 均可显著增加带田作物对钾的吸收, 各施肥模式混合籽粒吸钾量以处理 E 最高, 较处理 B 增加 45.3%。玉米植株和混合植株吸钾量, 均以处理 F 最高, 较处理 B 分别提高 116.4%和 69.0%, 说明氮磷钾配施条件下采用控释肥料更有利于植株对钾的累积。处理 D 下, 小麦的植株吸钾量略高于处理 B, 籽粒吸钾量则低于处理 B, 玉米植株、籽粒和混合植株、籽粒吸钾量均较处

理 B 有所增加, 但增加幅度显著低于处理 E。说明增施氮磷肥尽管能在一定程度上促进带田作物对钾的吸收, 但其效果不及处理 E 和处理 F。处理 G 的小麦、玉米籽粒吸钾量均较处理 B 低。

表 4 不同施肥模式的带田作物植株和籽粒吸钾量

处理	吸钾量/(kg/hm ²)					
	小麦		玉米		混合	
	植株	籽粒	植株	籽粒	植株	籽粒
A(CK)	51.2	7.2	54.7	14.7	105.9	21.9
B	60.8	7.8	62.9	20.5	123.7	28.3
C	77.2	9.6	71.8	18.9	148.9	28.5
D	63.1	4.1	109.9	32.9	173.0	37.1
E	57.5	4.0	135.6	37.1	193.0	41.1
F	73.0	4.9	136.1	32.2	209.1	37.1
G	59.5	4.9	99.2	19.0	158.7	23.9

2.3 不同施肥模式对氮肥偏生产力、氮肥利用率、氮肥农学效率的影响

氮肥的偏生产力(PFP)的大小反映了施入土壤中肥料氮的生产能力^[7]。从表 5 可看出, 不同施肥模式的氮肥偏生产力依次为处理 E>处理 F>处理 C>处理 G>处理 D>处理 B>处理 A (CK), 其中处理 E 氮肥偏生产力分别较处理 B、处理 D、处理 C 增加 68.8%、38.8%、25.1%, 处理 C 和处理 D 间差异不显著。氮肥利用率(RE)是评价作物对氮肥吸收的主要指标^[9]。不同施肥模式对小麦 / 玉米带田的氮肥利用率影响不同, 表现为处理 E>处理 F>处理 D>处理 G>处理 C>处理 B>处理 A (CK), 其中处理 E 下间作体系的氮肥利用率最高, 较处理 B、处理 D 分别增加 34.5 和

14.0 百分点。氮肥农学效率(AE)是评价肥料增产效应较为准确的指标。处理 E、处理 F 的氮肥农学效率均明显高于其它处理, 较处理 D 增幅分别达 36.9%和 19.7%。

表 5 不同施肥模式对氮肥偏生产力、氮肥利用效率和氮肥农学效率的影响

处理	氮肥偏生产力	氮肥利用率	氮肥农学效率
	/(kg/kgN)	%	/(kg/kgN)
A(CK)		0	0
B	35.2	18.6	9.4
C	47.5	35.6	15.3
D	42.8	39.1	19.8
E	59.4	53.1	27.1
F	56.0	50.4	23.7
G	46.0	33.5	13.8

2.4 不同施肥模式收获后带田土壤硝态氮的垂直分布及累积

对不同处理下小麦 / 玉米带田收获后土壤硝态氮的测定结果(图1)表明, 表层土壤硝态氮含量相对较高, 随着土壤剖面垂直向下残留的硝态氮含量逐渐降低, 至 20~40 cm 处达到最低, 然后逐渐升高, 到 100 cm 处达到最高, 呈单峰单谷变化趋势。除空白对照(CK)和处理 E 外, 其它施肥模式均在 90~100 cm 土层处出现累积峰。带田土壤中残留硝态氮及其分布直接受栽培模式和施氮量的影响, 随施氮量的增加土壤硝态氮残留逐渐增大。小麦带土壤中硝态氮的累积量为处理 G>处理 D>处理 B>处理 F>处理 C>处理 E>处理 A (CK); 玉米带土壤中硝态氮的累积量为处理 D>

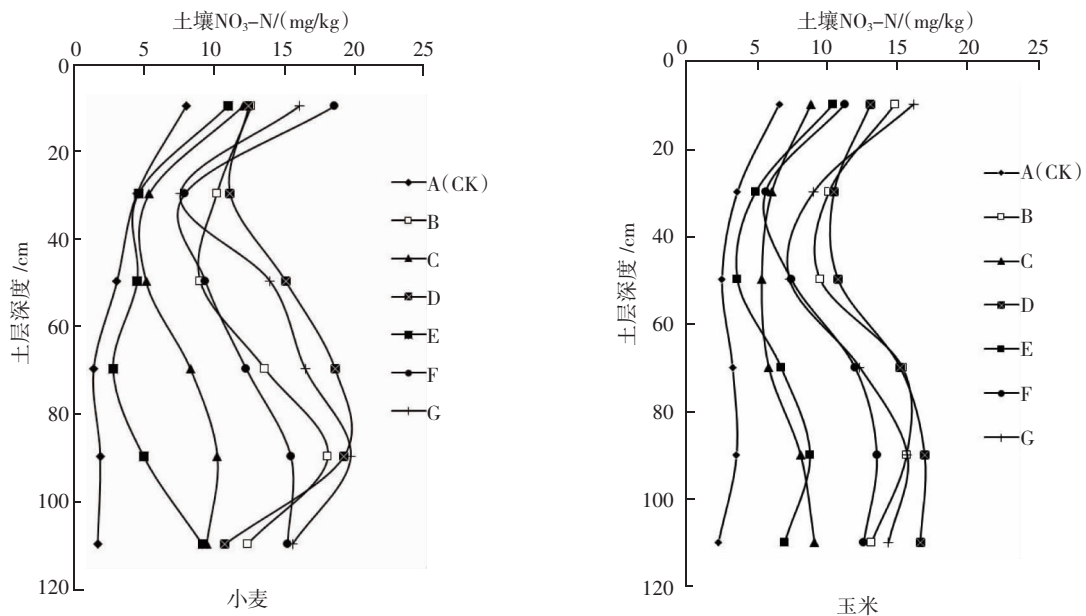


图 1 不同施肥模式对收获后带田土壤硝态氮垂直分布的影响

处理 G>处理 B>处理 F>处理 C>处理 E (处理 A (CK))(图2)。相对于处理 B 和处理 D, 处理 E 下 0~120 cm 土层土壤中的硝态氮累积量分别减少 47.0%~51.7%、43.9%~58.0%, 说明合理的栽培措施在确保作物高产的同时, 还可使土壤中残留的硝态氮处于较低水平, 进而降低氮素损失及环境污染风险。

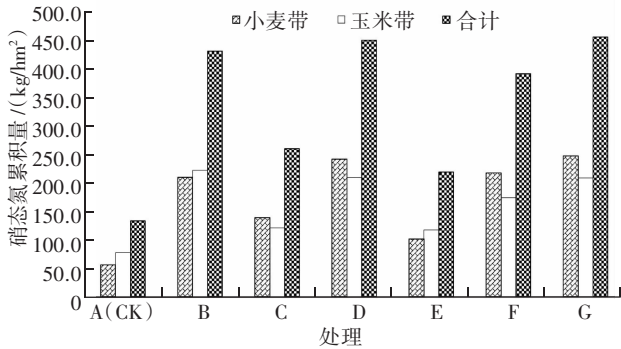


图2 不同施肥模式下收获后土壤硝态氮累积的影响

3 讨论与结论

在本研究条件下, 优化施肥模式在施用氮肥的基础上合理配施磷、钾肥和有机肥, 促进了养分比例的协调供给和保持养分平衡, 使带田作物对 N、P、K 营养元素的吸收增多, 玉米籽粒和植株中磷、钾含量与氮、磷、钾吸收量都明显增加, 玉米植株中 N、P、K 的吸收量分别较农户施肥模式增加了 70.4、59.8、72.7 kg/hm²。这些都为小麦/玉米带田产量提高奠定了物质基础。

氮肥偏生产力、氮肥利用效率和氮肥农学效率是用来表征氮肥利用效率的常用量化指标^[10]。本研究中, 增量施肥模式虽然使间作体系吸收了较多的氮素、磷素, 但氮肥利用效率反而降低, 不利于氮素的有效利用; 相对于增量施肥模式, 优化施肥模式的氮肥偏生产力、氮肥农学效率分别提高了 38.8%和 36.9%, 氮肥利用效率增加了 14 个百分点。说明优化施肥模式能够显著增加小麦/玉米带田体系的肥料利用率, 实现高产与资源高效利用的协同提升。

氮肥超量施用及其利用效率不断下降使得农业面源污染日趋严重, 氮、磷、钾不平衡施用是引起土壤 NO₃⁻-N 大量累积的重要因素^[7]。优化施肥模式在提高间作体系产量的前提下, 土壤中硝态氮累积量明显降低, 相对于农户施肥模式和增量施肥模式, 0~120 cm 土层土壤硝态氮累积量分别减少 47.0%~51.7%、43.9%~58.0%, 这既保护

了土壤的理化性质, 又降低了 NO₃⁻-N 流失造成的地下水污染, 实现了耕地可持续发展。

增施化肥是保证带田高产的关键, 但又会导致养分资源的过度浪费和对土壤环境的潜在威胁。因此, 要实现作物高产与资源高效且环境友好, 就必须走挖掘作物产量潜力和提高土壤生产力, 而非过度依赖水肥等大量投入的道路^[11-12]。在西北干旱灌区的小麦/玉米带田体系中, 采取以有机肥化肥配施、养分均衡供给与合理运筹为核心的优化施肥模式, 既能充分发挥作物的增产潜力, 又能提高肥料利用效率, 减少土壤中的硝态氮残留, 对实现农业绿色增效具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403-415.
- [2] 井大炜. 优化施氮对高产小麦/玉米带田产量和氮利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2008(9): 55-57; 60.
- [3] 孙景玲, 马忠明, 杨蕊菊, 等. 河西地区间作小麦土壤硝态氮含量时空动态变化分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 882-885.
- [4] 胡新元, 马忠明, 崔云玲, 等. 施肥对河西绿洲灌区小麦玉米带田产量及效益的影响[J]. 甘肃农业科技, 2010(6): 14-16.
- [5] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [6] 唐文雪, 马忠明, 魏焱, 等. 地膜残留量对河西绿洲灌区玉米田土壤理化性状的影响[J]. 甘肃农业科技, 2022, 53(6): 82-87.
- [7] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003(1): 24-28.
- [8] 陈磊, 郝明德, 张少民, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(2): 230-235.
- [9] 于飞, 施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用效率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324.
- [10] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845.
- [11] 叶优良, 包兴国, 宋建兰, 等. 长期施用不同肥料对小麦玉米间作产量、氮吸收利用和土壤硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004(2): 113-119.
- [12] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008(5): 915-924.