

配施增效助剂对四川旱地小麦的减氮效应研究

李俊积, 马海艳, 马宏亮, 雷芳, 邹乔生, 祝婷婷, 杨洪坤, 黄秀兰, 樊高琼

(四川农业大学农学院农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130)

摘要: 为探究增效助剂对四川旱地小麦的减氮效应, 设置空白对照(CK0)、常规施氮不追肥(CK1, 施氮量 187.5 kg/hm²)、常规施氮量下底追比 6 : 4(CK2, 施氮量 187.5 kg/hm²)、增效助剂拌常规复合肥, 减氮 20%(jf—20%)、减氮 30%(jf—30%)、增效助剂螯合脲甲醛减氮 20%(jn—20%)、减氮 30%(jn—30%)、减氮 40%(jn—40%)、增效助剂螯合脲甲醛肥+卵磷脂有机肥 3 000 kg/hm² 减氮 27%(jny—27%)等 9 个处理, 分析测定不同处理下土壤氮素动态、小麦叶绿素含量、叶面积指数动态、生长速率、氮素积累与转运、产量及其构成、氮肥利用率等。结果表明: 增效助剂处理后显著降低开花期和成熟期土壤中硝态氮与铵态氮含量, 较 CK1 开花期降幅分别为 6.8%~9.8%和 8.7%~14.5%, 成熟期降幅分别为 14.9%~20.8%和 15.9%~20.0%。花后 30 天叶面积指数以 jn—20%与 jny—27%最高, 分别较 CK1、CK2 提高 5.3%和 5.8%, jn—20%与 jny—27%处理下, 叶面积指数较 CK1 提高 5.83%和 5.24%; jf、jn、jny 模式花后氮素积累量较 CK1、CK2 显著增加, 幅度分别为 33.7%~73.1%和 29.8%~68.0%, 花后氮素转运量提升幅度分别为 116.1%~217.8%和 107.1%~204.0%。jf、jn、jny 模式小麦开花—成熟期生长速率较 CK1 提高 13.2%~33.8%。配施增效助剂后减氮不减产, jf—20%、jn—20%、jny—27%增产幅度为 0.2%~2.9%, 以 jn—20%和 jny—27%处理产量最高, 较 CK1 分别增产 2.6%和 2.9%, 但与 CK1 和 CK2 差异不显著。jn、jf、jny 模式显著提高氮肥利用率与氮肥偏生产力, 较 CK1 分别增加 6.7%~24.0%和 10.3%~25.8%。增效助剂通过促进养分吸收减少土壤中氮素残留来提高肥料利用率, 实现减氮不减产, 施用增效助剂拌肥、增效助剂螯合脲甲醛可以实现减氮 20%, 增效助剂螯合脲甲醛配合卵磷脂有机肥 3 000 kg/hm² 可实现减氮 27%。

关键词: 冬小麦; 增效助剂; 产量; 氮肥利用率; 氮素运转; 铵态氮; 硝态氮

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0312-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.03.040

Research on Nitrogen Reducing Effect of Synergist on Dryland Wheat in Sichuan Province

LI Junji, MA Haiyan, MA Hongliang, LEI Fang, ZOU Qiaosheng, ZHU Tingting,

YANG Hongkun, HUANG Xiulan, FAN Gaoqiong

(Agricultural College of Sichuan Agricultural University, Southwest Key Laboratory of Crop

Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Chengdu 611130)

Abstract: In order to explore the nitrogen reducing effect of synergists on dryland wheat in Sichuan, the following 9 treatments were set up in this study: blank control (CK0); Conventional nitrogen application without topdressing (CK1, nitrogen application amount 187.5 kg/hm²); The ratio of basal dressing to topdressing under conventional nitrogen application rate is 6 : 4 (CK2, nitrogen application rate is 187.5 kg/hm²); Synergistic auxiliary mixed with conventional compound fertilizer, reducing nitrogen by 20% (jf—20%) and 30% (jf—30%); Synergistic auxiliary chelating urea formaldehyde reduces nitrogen by 20% (jn—20%), 30% (jn—30%) and 40% (jn—40%); Synergistic auxiliary chelated urea formaldehyde fertilizer + lecithin organic fertilizer 3 000 kg/hm² reduced nitrogen by 27% (jny—27%); The dynamics of soil nitrogen, wheat chlorophyll content, leaf area index, growth rate, nitrogen accumulation and transport, yield and its composition, and nitrogen utilization efficiency were analyzed and measured under different treatments. The results showed that each treatment of jf, jn and jny model significantly reduced the content of ammonia

收稿日期: 2022-09-20

资助项目: 四川省“十四五”重大科技专项(2022ZDZX0014); 四川省“十四五”重点研发项目(2021YFYZ0002)

第一作者: 李俊积(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事肥料高效利用研究。E-mail: 2544073538@qq.com

通信作者: 樊高琼(1976—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事小麦优质高产栽培研究。E-mail: fangao20056@126.com

nitrogen and nitrate nitrogen in soil at flowering and mature stages, which were 6.8%~9.8% and 8.7%~14.5% lower than that of CK1 at flowering stage, and 14.9%~20.8% and 15.9%~20.0% lower at mature stage, respectively. At 30 days after anthesis, the leaf area index of jn—20% and jny—27% was the highest, 5.3% and 5.8% higher than that of CK1 and CK2, respectively. The leaf area index of jn—20% and jny—27% was 5.83% and 5.24% higher than that of CK1; Each treatment of jf, jn and jny mode significantly increased the post anthesis nitrogen accumulation compared with CK1 and CK2, with the amplitude of 33.7%~73.1% and 29.8%~68.0% respectively, and the post anthesis nitrogen transport increased by 116.1%~217.8% and 107.1%~204.0% respectively. The growth rate of each treatment of jf, jn and jny in flowering maturity stage was higher than that of CK1, and the range was 13.2%~33.8%. Moreover, wheat yield will not decrease after nitrogen fertilizer reduction and synergist application. The yield increase of jf—20%, jn—20% and jny—27% was 0.2%~2.9%, and the yield of jn—20% and jny—27% treatment was the highest, 2.6% and 2.9% higher than that of CK1, however, there is no significant difference with CK1 and CK2. jn, jf and jny modes significantly improved nitrogen utilization efficiency and partial productivity of nitrogen fertilizer, which were 6.7%~24.0% and 10.3%~25.8% higher than CK1 respectively. According to the research, the synergists can improve the fertilizer utilization rate by promoting nutrient absorption and reducing nitrogen residues in the soil, so as to reduce nitrogen without reducing production. The application of synergists to mix fertilizer and synergists to chelate urea formaldehyde can reduce nitrogen by 20%, and synergists to chelate urea formaldehyde with lecithin organic fertilizer 3 000 kg/hm² can reduce nitrogen by 27%.

Keywords: winter wheat; synergistic additives; yield; utilization rate of nitrogen fertilizer; nitrogen operation; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen

小麦是我国第二大口粮作物^[1]。随着人口刚性增长和耕地面积减少,为确保粮食安全和口粮绝对自给,追求高产是一个永恒的话题^[2]。同时,环境友好、生态安全也是当前作物生产的重要目标。我国化肥常年使用量高达6 000万t,占世界总量的35%,单位耕地面积的化肥用量约为世界水平的3倍^[3],超量施用化肥使得其利用率仅为30%左右。滞留于土壤中的氮素加速土壤的退化,经过淋溶后,以硝酸盐形式向下偏移污染水体污染环境^[4]。减少施氮量,提高肥料利用率是当前我国小麦生产面临的重要课题。

前人^[5-8]研究认为,提高肥料利用率有多种方式,其中,使用新型肥料是提升肥料利用率的直接途径,刘宇辉等^[5]研究表明,混施菌肥施氮减量50%使小麦氮素吸收效率由常规施肥的1.75 kg/kg显著提高至4.53 kg/kg,小麦氮素生理利用率较常规施肥的18.5 kg/kg显著下降至14.9 kg/kg;张祥等^[6]研究表明,搭配腐殖酸肥料在小麦生产中显著提升氮素利用率10.92%;庄振东等^[7]发现,施用腐殖酸肥料氮挥发量显著高于常规施肥。袁嫚嫚等^[8]认为,冬小麦配施缓释尿素氮肥利用率较普通尿素显著提升43.7%~91.9%,同时降低49.7%土壤氮素滞留。但也有研究^[9-10]表明,缓释尿素易受土壤、温度、降水等因素影响,进而影响其控释持久性及释放速率,且其养分释放较难实现与作物生长吸收规律协同,价格通常为传统化肥的2~8倍,成本限制其大多运用于经济价值较高的园

艺、果蔬等产业,减氮增效方法仍需要进行探索。

近年随着新材料新方法的兴起,增效助剂(俗称农药伴侣)在农药减量中逐渐流行,也为化肥减施提供新思路,增效助剂通常在药、肥加工或使用过程中添加,是用于改善药、肥理化性质的辅助成分^[11],在药、肥减施上研究较多且作用良好,如农药中配施聚氧乙烯型非离子表面活性剂可改善农药叶面喷施后的分布,促进渗透,降低农药在土壤中的移动性,减缓其降解速率^[12],脂肪酸聚氧乙烯酯非离子表面活性剂可提高肥料在水中的溶解性、在植株上的附着性,促进植物养分吸收^[13]。“激健”是种新型多元醇型非离子活性助剂,与农药搭配使用可一定程度内增加农药的渗透传导率及吸收率,相同药效实现农药减量10%~30%^[14]。“激健”作为农药助剂报道相对较多,与肥料拌施或整合,在大豆、水稻上的减氮效应有初步报道^[15-16],如大豆肥料用量减少1/3,配施“激健”较常规施肥增产8.2%,水稻减氮40%,配施“激健”可使产量与常规施肥无显著差异,但其在小麦上研究较少,数据支撑不足,仍需试验验证。基于此,通过设置不同减氮比例,研究减氮后配施此非离子增效助剂对小麦生长、肥料利用率的影响,以期对四川旱地小麦减氮增产提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于四川省崇州市桤泉镇四川农业大学现

代农业研发基地(30°53′25″N,103°63′43″E),属亚热带湿润季风气候区。该区年平均气温为 15.8℃,平均降水量为 1 012.4 mm,平均日照时间为 1 162 h,土壤为砂壤土,土壤有机质、全氮分别为 26.2,1.8 g/kg,速效磷、速效钾、铵态氮、硝态氮分别为 11.8,85.6,2.4,4.3 mg/kg。

1.2 试验材料

小麦品种选用四川省主推品种“蜀麦 133”,由四川农业大学选育。增效剂选用表面活性助剂“激健”。“激健”为海藻多糖等成分构成的多元醇型非离子活性增效助剂(简称增效助剂)，“激健”脲甲醛为“激健”螯合成的复合肥(N 25—P 9—K 16),均由成都激健生物科技有限公司提供,复合肥(N 26—P 10—K 16)购于当地农资市场。

1.3 试验设计与管理

试验采用单因素随机区组设计,施肥模式与减

量梯度(表 1)共 9 个处理,减氮梯度均与 CK1、CK2 对照,底肥不追肥 CK1,常规施肥+追肥 CK2,“激健”+常规肥 jf,“激健”脲甲醛 jn,“激健”脲甲醛+卵磷脂有机肥 jny),jf 处理,施用前将“激健”与肥料拌匀,jn 为“激健”螯合肥料,jny 为“激健”螯合肥料与卵磷脂有机肥混施;肥料作底肥施用,采用撒施,然后与土壤混匀,开沟播种。采用冬小麦—夏玉米轮作模式,播种前均把秸秆搬出试验地后翻耕,设 3 个重复,小麦播种采用条播,播种后覆土,基本苗为 2.7×10^6 株/hm²,小区面积 21 m² (4.2 m×5.0 m),列距 20 cm,播种每列与 5 m 边平行,共计 21 列,小麦于 2021 年 10 月 27 日播种,2022 年 5 月 8 日收获,肥料除常规对照 CK2 苗期追肥外,追肥日期为 11 月 24 日,追肥量为 160.5 kg/hm² 有效成分 46% 的尿素,其余均按底肥一次施用,其他田间管理同当地高产田一致。

表 1 施肥模式与梯度

处理	施肥模式与梯度	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	±N/%	基追比	施钾量/ (kg·hm ⁻²)	施磷量/ (kg·hm ⁻²)
CK0	空白对照	0	—	—	—	—
CK1	对照:720 kg/hm ² (26—10—16),不追肥	187.5	—	1:0	115.0	72.0
CK2	对照:432 kg/hm ² (26—10—16)+160.5 kg/hm ² 尿素苗期追肥	187.5	—	6:4	69.0	43.2
jf—20%	“激健”3000 mL/hm ² +600 kg/hm ² (25—9—16,下同)	150.0	-20	1:0	96.0	54.0
jf—30%	“激健”3000 mL/hm ² +525 kg/hm ²	131.3	-30	1:0	72.0	47.3
jn—20%	“激健”脲甲醛肥 600 kg/hm ²	150.0	-20	1:0	96.0	54.0
jn—30%	“激健”脲甲醛肥 525 kg/hm ²	131.3	-30	1:0	84.0	47.3
jn—40%	“激健”脲甲醛肥 450 kg/hm ²	112.5	-40	1:0	72.0	40.5
jny—27%	“激健”脲甲醛肥 450 kg/hm ² +卵磷脂有机肥 3000 kg/hm ²	137.0	-27	1:0	87.0	70.5

1.4 测定项目与方法

植株样品:每小区分别在小麦拔节期、开花期、成熟期连取 4 穴(约 30 株)有代表性的均匀样本,测量其叶绿素含量(丙酮—乙醇浸提)、叶面积指数及干物质积累量,分器官装袋后 105℃杀青 30 min 后在 80℃烘干至恒重后称重,磨粉过 60 目筛,采用浓 H₂SO₄ 消煮,凯氏定氮法测定相关部位氮素含量。收获前每小区连续调查 1 行(1 m²),统计有效穗数,另连续取 30 穗,调查穗粒数、千粒重(2~3 个平行),除去边行连取 3 行(3 m²)实收计产,脱粒后晒干,按 13% 标准含水量折算实际产量换算为公顷产收,另根据成熟期生物量构成计算收获系数。

土壤样品:采用五点取样法,分别在拔节期、开花期、成熟期取每小区 0—20 cm 土层,混匀后待其风干,磨出 10 目与 60 目均匀土样,土壤样品分析方法参考《土壤农化分析》^[17]:土壤硝态氮含量测定采用紫外分光光度法;土壤铵态氮含量测定采用靛酚蓝比色法。

1.5 相关指标计算公式及分析

相关指标计算公式参照袁嫚嫚等^[8]、谭凯炎等^[18]研究进行。

籽粒收获系数=成熟期籽粒干物质积累量/成熟期总生物量×100%

氮素积累量=各器官干物质积累量×各器官氮含量

花前氮素运转量=开花期营养体氮积累量—成熟期营养体氮积累量

花前氮素运转率=花前氮素运转量/开花期营养体氮积累量×100%

花后氮素积累量=成熟期氮素积累量—开花期氮素积累量

花后氮素运转量=花后氮素积累量—成熟期营养体氮素积累量

花后氮素运转率=花后氮素运转量/花后氮素积累量×100%

花前氮素转运对籽粒氮贡献率=花前氮素运转量/成熟期籽粒氮积累量×100%

花后氮素分配对籽粒的贡献率=花后氮素运转量/成熟期籽粒氮积累量×100%

氮肥利用效率=(施氮区地上部分氮积累量—不施氮区地上部分氮积累量)/施氮量×100%

肥料贡献率 = (施氮区作物产量 - 不施氮作物产量) / 施氮区作物产量 × 100 %

氮收获指数 = 成熟期籽粒氮积累量 / 成熟期植株氮素积累量 × 100 %

氮肥偏生产力 = 施氮区籽粒产量 / 施氮量

生长速率 = 当前测定生育阶段干物质积累量 - 上一测定生育阶段干物质积累量 / 间隔天数

采用 Excel 2010 软件整理试验数据, 采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析, 采用最小显著差数法 (LSD) 进行显著性检验 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 增效助剂对土壤铵态氮、硝态氮含量的影响

由图 1 可知, 施用增效助剂后土壤中硝态氮 (图

1a) 和铵态氮 (图 1b) 含量随生育进程推进较 CK1 显著减少, 受施肥模式与减量梯度影响, 开花期 jf、jn、jny 等模式土壤中硝态氮、铵态氮含量较 CK1 显著下降 ($p < 0.05$), 硝态氮含量下降幅度为 6.8%~9.8%, 其中以 jn-30%、40% 处理下降幅度最大, 分别为 9.8%, 9.3%, 铵态氮含量下降幅度为 8.7%~14.5%, 其中 jf-30% 与 jn-40% 下降幅度最大, 分别为 12.5%, 14.5%; 成熟期 jf、jn、jny 等模式土壤中硝态氮、铵态氮含量较 CK1 显著下降 ($p < 0.05$), 降幅分别为 14.9%~20.8% 和 15.9%~20.0%, 其中铵态氮含量降幅以 jn-30% 处理最高, 硝态氮含量降幅以 jn-40% 处理最高。增效助剂 + 减氮显著降低开花期和成熟期土壤中铵态氮与硝态氮的残留量。

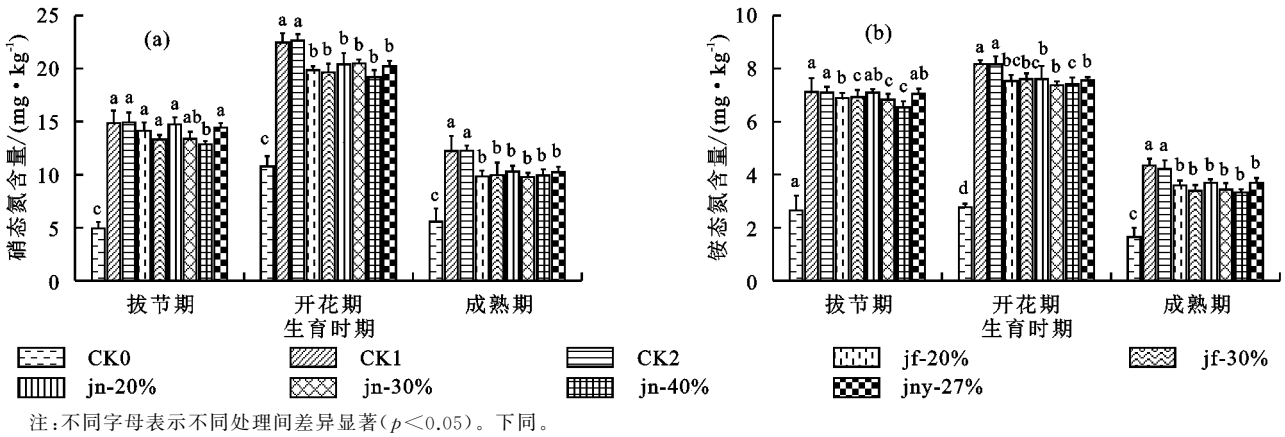


图 1 增效助剂对土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

2.2 增效助剂对冬小麦叶面积指数及叶绿素的影响

由表 2 可知, 开花期叶绿素含量 jn-20% 与 CK2 较高, 显著高于 jf-30%、jn-30%、jn-40% 和 CK0, 而花后 30 天, 叶绿素含量以 jn-20% 最高, 其次是 jf-20% 和 jny-27%, 三者均显著高于 CK2 ($p < 0.05$), jf-30%、jn-30%、40% 与 CK2 无显著差异 ($p > 0.05$), jn-20%、jny-27%、jf-20% 处理较 CK1、CK2 分别提高 10.6%, 7.6%, 23.4% 和 20.1%, 8.5%, 21.0%。开花期叶面积指数以 CK1 和 CK2 最大, 其次是 jn-20% 与 jny-27%, 四者之间差异不显著 ($p > 0.05$), 与其余处理差异显著 ($p < 0.05$)。花后 30 天叶面积指数则以 jn-20% 与 jny-27% 最高, 分别较 CK1、CK2 提高 5.3%, 5.8%, 但差异不显著, 其余处理较 CK1、CK2 叶绿素含量有所降低, 除 jf-30% 外差异均不显著 ($p > 0.05$)。可见, 增效助剂延缓花后叶绿素含量的下降, 保持较大的光合叶面积。

2.3 增效助剂对冬小麦生长速率及干物质积累的影响

进一步分析表明 (表 3), CK1 处理显著促进拔节—开花的生长速率, 而 jf、jny、jn 模式主要促进开花—成熟期的生长速率, 进而提高成熟期的干物质积累, 开花—成熟期生长速率较 CK1 都有不同程度提升, 提升幅度为

13.2%~33.8%, jf-20%、jn-20%、jn-30%、jn-27% 较 CK1、CK2 显著提升 ($p < 0.05$), 其中以 jny-27% 与 jn-20% 最高, 较 CK1 分别提高 33.8%, 28.4%, 较 CK2 分别提高 28.8%, 23.6%。

表 2 增效助剂对植株叶面积指数及叶绿素含量的影响

处理	开花期	花后 30 d	开花期叶	花后 30 d
	叶绿素/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素/ (mg·g ⁻¹)	面积指数 (LAI)	叶面积指数 (LAI)
CK0	1.77d	0.97e	1.33d	0.74d
CK1	3.15ab	1.98bc	6.04a	2.82ab
CK2	3.20a	1.77d	6.07a	2.82ab
jf-20%	3.13ab	2.15ab	5.46bc	2.67bc
jf-30%	2.82bc	1.78cd	5.25c	2.60c
jn-20%	3.26a	2.19a	5.93a	2.97a
jn-30%	2.82bc	1.82cd	5.52b	2.66bc
jn-40%	2.69c	1.77d	5.43bc	2.66bc
jny-27%	3.10ab	2.13ab	5.92a	2.99a

注: 同列不同字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.4 增效助剂对冬小麦产量及其构成的影响

由表 4 可见, 增效助剂处理后, 适度减氮不减产。jf-20%、jn-20%、jny-27% 处理下较 CK1 产量有所提高但不显著 ($p > 0.05$), 增产幅度为 0.2%~

2.9%,其余处理较 CK1 均有不显著减产($p>0.05$),幅度为 0.7%~1.1%。jn—20%与 jny—27%产量不减反增的原因是有效穗数和穗粒数的增加,单位面积粒数提高,jn—20%、jny—27%处理下有效穗数较 CK1 分别增加 3.1%,6.1%,穗粒数分别增加 1.4%,0.3%,单位面积粒数分别显著增加 5.0%,5.9%。

2.5 增效助剂对冬小麦氮素积累与转运的影响

由表 5 可知,CK1 和 CK2 主要促进花前营养器官氮素积累与转运,与 jf、jn、jny 模式处理差异显著;jf、jn、jny 模式主要促进花后氮素同化积累与转运,较

CK1、CK2 处理显著提升($p<0.05$),花后氮素积累量提升幅度分别为 33.7%~73.1%,29.8%~68.0%,花后氮素转运量提升幅度分别为 116.1%~217.8%,107.1%~204.0%,两者以 jf—20%、jn—20%、jny—27%最高。jf、jn、jny 模式花后氮素运转率、对籽粒贡献率也均显著高于 CK($p<0.05$),前者提升幅度较 CK1、CK2 分别为 20.7%~27.7%,20.2%~27.2%,后者提升幅度较 CK1、CK2 分别为 11.7%~14.3%,11.3%~13.9%,两者同样以 jf—20%、jn—20%、jny—27%最高。

表 3 增效助剂对小麦干物质积累及其速率的影响

处理	生长速率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)			播种—成熟	
	播种—拔节	拔节—开花	开花—成熟	生长速率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	积累量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK1	34.2ab	158.9b	94.3c	90.1cde	17297.7cde
CK2	33.8ab	167.5a	98.0c	93.6bc	17979.1bc
jf—20%	35.3a	138.2e	119.1ab	91.1cd	17495.0cd
jf—30%	34.5ab	140.8e	109.2bc	88.7de	17032.8de
jn—20%	35.2a	151.7cd	121.1ab	96.1ab	18453.4ab
jn—30%	32.4b	148.6d	117.5ab	92.6bcd	17783.2bcd
jn—40%	30.0c	141.7e	106.8bc	86.5e	16603.0e
jny—27%	34.3ab	156.5bc	126.2a	98.3a	18881.2a

注:播种—拔节阶段为 2021 年 10 月 27 日至 2022 年 1 月 14 日,共计 78 天;拔节—开花阶段为 2022 年 1 月 14 日至 3 月 14 日,共计 60 天;开花—成熟阶段为 2022 年 3 月 14 日至 5 月 8 日,共计 54 天;全生育期为 192 天,各处理生育进程基本一致。

表 4 增效助剂对小麦产量及其构成的影响

处理	有效穗数/ (穗 $\cdot \text{m}^{-2}$)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	单位面积粒数/ (粒 $\cdot \text{m}^{-2}$)	实际产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获 系数/%
CK0	331	29.8	50.0	9895	4284.5	45.7
CK1	413ab	48.5a	50.7ab	20112c	7618.7abc	46.7ab
CK2	423ab	48.7a	49.0c	20760b	7782.8ab	46.3ab
jf—20%	418ab	46.5b	49.2c	19443d	7633.0abc	47.7a
jf—30%	402b	46.0b	48.9c	18516e	7533.5c	46.3ab
jn—20%	426ab	49.2a	49.5bc	21124a	7820.6a	46.7ab
jn—30%	420ab	46.3b	50.7ab	19445d	7562.5bc	46.3ab
jn—40%	401b	44.8c	51.5a	17715f	7468.9c	45.7b
jny—27%	438a	48.7a	48.7c	21302a	7840.4a	47.3ab

注:CK0 指标仅作后续氮素利用指标计算所需,不参与方差分析。

表 5 增效助剂对氮素积累及其运转的影响

处理	花前营养器官 氮素积累量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花前营养器官 氮素运转量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花后氮素 积累量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花后氮素 运转量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	总氮素积累量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	花前氮素 运转率/%	花后氮素 运转率/%	花前氮素 转运对籽粒的 贡献率/%	花后氮素积 累对籽粒的 贡献率/%
CK1	134.6a	111.5a	34.7d	11.5c	169.3cd	82.8a	33.1b	76.3a	23.7b
CK2	136.1a	112.4a	35.7d	12.0c	171.8c	82.6a	33.6b	75.9a	24.1b
jf—20%	115.2b	93.4b	54.5abc	32.6ab	169.7cd	81.1b	59.9a	63.2b	36.8a
jf—30%	106.1c	84.5cd	48.6c	27.1b	154.6e	79.7bc	55.6a	63.5b	36.5a
jn—20%	118.8b	94.2b	57.7ab	33.1ab	176.5b	79.3c	57.3a	62.0b	38.0a
jn—30%	115.2b	92.2bc	50.5bc	27.5b	165.7d	80.0bc	54.4a	64.6b	35.4a
jn—40%	104.0c	82.6d	46.4c	24.9b	150.4e	79.4c	53.8a	64.1b	35.9a
jny—27%	121.1b	97.8b	60.0a	36.7a	181.1a	80.7bc	60.8a	62.0b	38.0a

2.6 增效助剂对肥料利用率及经济收益的影响

由表 6 可知,jf、jn、jny 模式处理后可促进肥料的吸收利用,氮肥利用效率和氮肥偏生产力显著提升($p<0.05$),较 CK1、CK2 氮肥利用效率分别提升 6.7%~24.0%,5.3%~22.6%,以 jf—20%、jn—20%、jny—27%最高,氮肥偏生产力分别提升 10.3%~

25.8%,9.4%~24.9%,以 jn—40%最高。氮收获指数以 jf—20%与 jny—27%最高,显著高于其余处理($p<0.05$)。jn—20%和 jny—27%处理下的肥料贡献率与 CK2、CK1 无显著差异($p>0.05$)jf、jn、jny 模式下较 CK1 均有增收,增收幅度为 0.6%~3.3%,jf 模式,jn—30%,40%均降低肥料成本投入。

表 6 增效助剂对肥料利用率及经济收益的影响

处理	氮肥利用 效率/%	氮收获 指数/%	肥料 贡献率/%	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	肥料成本/ (元·hm ⁻²)	经济收益/ (元·hm ⁻²)
CK1	41.6e	86.3b	44.1ab	40.6e	3240.0	21977.9b
CK2	43.0e	86.2b	45.3a	41.5e	3586.0	22174.9ab
jf—20%	52.3c	87.1a	44.2ab	50.9d	3150.0	22115.1ab
jf—30%	48.3d	86.1b	43.5b	57.4b	2812.5	22123.5ab
jn—20%	56.8b	86.1b	45.6a	52.1c	3240.0	22646.1ab
jn—30%	56.7b	86.1b	43.7b	57.6b	2835.0	22196.8ab
jn—40%	52.5c	85.8b	43.0b	66.4a	2430.0	22291.9ab
jny—27%	65.6a	87.1a	45.7a	57.3b	3240.0	22711.6a

注:复合肥、尿素单价分别为 4.5、4 元/kg,人工追肥成本为 1 000 元/hm²,“激健”助剂为 150 元/L,“激健”脲甲醛、有机肥分别为 5.4、0.27 元/kg,小麦参照市场均价 3.31 元/kg,表中经济收益为除去肥料成本后收益,肥料成本每处理间各重复均相同,故不参与方差分析。

3 讨论

3.1 增效助剂有效促进小麦对氮素的吸收,降低土壤氮素残留,增进土壤健康

对冬小麦而言,施肥后氮素主要的损失途径是硝态氮的淋溶,多余的铵态氮也经过硝化作用转化为硝态氮^[19],土壤中硝态氮和铵态氮的丰缺可间接反映作物养分吸收情况和淋溶风险。若肥料养分释放过于迅速,高于作物的吸收速度,就有大量的硝态氮累积于土壤中,其含量越高,降雨淋溶污染的可能性越大,且降低氮肥的可利用率^[20]。非离子活性剂作为肥料增效助剂,有增强作物吸收及延缓肥料养分释放的功效^[15]。前人^[21]研究表明,添加海藻多糖可促进土壤团粒结构形成,增强土壤酶与生物活性,提高氮素吸收作用率,且延缓其在土壤中的释放、转化;也有研究^[22]表明,添加海藻多糖能在一定程度上减少径流引起的氮损失。本研究表明,增效助剂处理后促进小麦花后对土壤中的硝态氮和铵态氮的吸收,成熟期土壤中的铵态氮与硝态氮含量显著低于对照,推测是非离子活性增效助剂合成中添加的海藻多糖等成分进一步发挥作用,显著降低土壤氮素残留量,降低环境污染风险。

3.2 增效助剂促进小麦花后氮素积累,增强小麦花后氮素运转及对籽粒氮素的贡献

开花一成熟是小麦生长发育的一个重要阶段,小麦花后的生长状态,如叶片光合同化能力、根系的养分吸收能力对于产量形成尤为重要,小麦生育后期 jn、jny 较常规施肥仍保持适宜叶面积指数,叶绿素含

量较高,干物质积累量与积累速率提高显著,为高产稳产奠定物质基础,与养分的充分供应关系密切。增效助剂延缓了化肥的氮素释放转化,因而,在生育后期仍可向植株供给相对充足的养分,有研究^[23]表明,表面活性剂可增加作物蒸腾速率,利于养分吸收与生长速率提高。同时,表面活性剂可与生物膜亲脂、水基团作用,增加细胞膜透性,改变物质跨膜运输速率^[24]。试验中 jf、jn、jny 花前氮素积累与转运量低于 CK1、CK2,而其花后氮素积累和转运量却分别显著提高 33.7%~73.1%和 29.8%~68.0%,116.1%~217.8%和 107.1%~204%,推测其在生育后期氮素供给量较 CK1 更充足,细胞膜透性增强从而增强养分运输,改变小麦植株的吸收与供给程度,使植株继续进行较好的养分吸收累积,维持植株的稳定生长且提高氮素利用效率。

3.3 施用增效助剂及增效助剂整合脲甲醛可实现小麦减氮不减产,提高经济效益

新型肥料或新型增效助剂有助于实现作物减氮稳产,在不同的区域和不同的作物上,减氮效应有所不同,将增效助剂与肥料整合,比减氮混配效果好。苏锦武等^[25]在湖北省黄梅县化肥减量 40%配施增效助剂后,水稻产量较常规施肥增产 0.3%~2.6%;张文超等^[16]在湖北省黄冈市施用增效助剂整合肥料减量 40%~60%,较常规施肥可使水稻增产 3.3%~17.3%,两者主要增产因素为结实率提高。朱丹等^[15]在黑龙江大豆生产中叶面肥配施增效助剂

减量 30% 后较常规施肥增产 8.2%, 其增产主要是粒数与粒重的提升。本研究表明, 较 CK1 混施增效助剂的 jf—20% 产量提高 0.2%, 螯合增效助剂肥料的 jn—20% 提高 2.7%, 螯合增效助剂肥料的 jny—27% 提高 2.9%, 使作物生长后期养分吸收增加, 进而物质积累增加, 促进有效穗数和穗粒数的增加而增产。再对其成本及收益核算, jf、jn、jny 模式下较 CK1 均有增收, 增收幅度为 0.6%~3.3%。综合小麦的产量、经济效益、氮素利用率、土壤氮素含量等相关指标, 认为 jf—20%、jn—20%、jny—27% 是值得推荐的 3 种简便有效的施肥模式与减量梯度。

4 结论

施用增效助剂后, 可有效促进养分吸收, 减少土壤中氮素残留, 增强花后氮素吸收; 施用后, 旗叶叶绿素含量提高, 叶面积指数大, 持续时间长, 花后干物质生产能力加强, 最终通过增加有效穗数和穗粒数而增产。增效助剂拌复合肥(jf)、增效助剂螯合脲甲醛肥模式(jn)可有效提高肥料利用率, 实现减氮 20% 而不减产, 增效助剂螯合脲甲醛肥+有机肥(jny), 可实现减氮 27% 而不减产。

参考文献:

- [1] 韩一军, 韩亭辉. “十四五”时期我国小麦增产潜力分析与实现路径[J]. 农业经济问题, 2021(7): 38-46.
- [2] 乔祥梅, 王志龙, 蒋欣彤, 等. 云南旱地小麦新品种产量和品质对减量施氮的响应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(6): 1365-1370.
- [3] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1-19.
- [4] 吕金岭, 王小非, 李太魁, 等. 不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦—夏玉米轮作农田氮挥发特征及排放系数[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1869-1879.
- [5] 刘宇辉, 田秀平, 张晴雯, 等. 复合菌肥部分替代化肥对冬小麦氮素吸收的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(2): 178-186.
- [6] 张祥, 梁济, 李接励, 等. 腐殖酸肥料对小麦氮素吸收利用的影响[J]. 化肥工业, 2019, 46(3): 61-66.
- [7] 庄振东, 李絮花. 腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1232-1239.
- [8] 袁嫚嫚, 邹刚, 孙义祥, 等. 缓释尿素对两种土壤小麦氮素运转、产量和土壤无机氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 233-239.
- [9] 张明伟, 马泉, 陈京都, 等. 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 15-21.
- [10] 马泉, 王亚华, 王梦尧, 等. 缓控释肥的发展应用与评价体系研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(18): 24-29.
- [11] 徐汉虹. 植物化学保护学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 22-23.
- [12] 孔祥吉, 韦笑, 王娜, 等. 聚氧乙烯型非离子表面活性剂类农药增效助剂的环境行为特性综述[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 197-206.
- [13] 王亮亮, 韩效钊, 杨静芳, 等. 生物表面活性剂对水溶肥料润湿性能的影响[J]. 浙江农业科学, 2014(8): 1253-1255.
- [14] 罗东洋, 彭昌家, 王明文, 等. 农药增效助剂“激健”在小麦条锈病防治中的应用效果[J]. 中国农学通报, 2018, 34(11): 113-117.
- [15] 朱丹, 祖英治, 胡亚军, 等. 大豆田应用激健减量增效田间试验及分析[J]. 黑龙江粮食, 2021(1): 67-69.
- [16] 张文超, 吕亮, 陈展鹏, 等. 激健复合肥和激健增效助剂对水稻减肥减药增产效应研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(1): 30-34.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 谭凯炎, 张心如, 耿金剑, 等. 北方冬小麦越冬前后生物量消长规律[J]. 中国农业气象, 2022, 43(4): 276-284.
- [19] 全智, 刘轩昂, 刘东. 土壤可溶性有机氮研究进展[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 277-288.
- [20] 刘微, 赵同科, 王丽英. 不同水分、施氮量对土壤中硝态氮含量分布的影响[J]. 华北农学报, 2006(3): 27-30.
- [21] 彭瑞雪, 朱建强, 吴启侠, 等. 不同氮肥运筹对直播稻田氮素损失与利用的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报, 1-12[2022-10-30].
- [22] 乔月, 朱建强, 吴启侠, 等. 不同氮肥对不同种植方式稻田径流氮流失与氮挥发的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 32-41.
- [23] 毛积磊, 彭守华. 不同浓度的表面活性剂处理萝卜幼苗产生的生物学效应分析[J]. 农业科技通讯, 2022(10): 137-139, 144.
- [24] 刁静茹, 赵保卫, 马锋锋, 等. 螯合型表面活性剂强化黑麦草修复 Cd 污染水体[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2238-2245.
- [25] 苏锦武, 陈遇春, 张舒, 等. 稻田施用激健肥和农药加激健助剂减肥减药增产效果示范[J]. 湖北植保, 2020(1): 28-30.