

刘德坤,张雅芬,骆瑶倩,等.机械深施基肥对麦季氮肥利用效率的影响[J].江苏农业科学,2022,50(17):235-240.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.17.038

机械深施基肥对麦季氮肥利用效率的影响

刘德坤^{1,2},张雅芬^{1,2},骆瑶倩³,郭 智^{1,4},张岳芳^{1,4},刘红江^{1,4}

(1.江苏省农业科学院句容稻米产业研究院,江苏镇江 212444;

2.江苏省句容市后白镇农业农村局,江苏镇江 212444; 3.江苏省句容市农技推广中心,江苏句容 212400;

4.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室,江苏南京 210014)

摘要:通过大田小区试验,以扬麦 19 为供试品种,探索机条播小麦的同时机械深施基肥对小麦产量构成及氮肥利用效率的影响。2 季研究表明,与农民常规施肥比较,机条播小麦时机械深施基肥,氮肥施用量减少 15%,小麦产量平均降低 0.67%,处理间差异不显著。基肥深施减氮处理虽然使小麦的生物产量平均下降 4.06%,但较高的经济系数保证了其产量与农民常规施肥基本持平。不同年度基肥深施减氮处理与农民常规施肥处理间小麦氮素累积量差异较为明显。基肥深施减氮处理使小麦氮素籽粒生产效率降低,但对小麦氮素收获指数未见明显影响。深施减氮处理使小麦氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力平均提高幅度分别达 16.17%、22.79% 和 16.85%,处理间的差异均达显著水平。采用机械深施基肥配合减量施氮,小麦不同生育时期麦田土壤速效氮含量均表现为显著提高。说明机械条播小麦时同步深施基肥并减施氮肥 15%,提高了麦田土壤速效氮素含量和麦季氮肥吸收利用效率,并获得了较高水平的小麦产量。

关键词:氮肥减量;小麦产量;土壤速效氮;氮素累积量;氮肥利用效率

中图分类号: S512.106 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)17-0235-06

小麦是我国三大主要粮食作物之一,统计数据表明,2018 年我国小麦种植面积为 2 430 万 hm^2 ^[1]。黄淮海平原是我国小麦主产区,近年来随着优质高产新品种的不断育成,以及配套栽培技术的不断进

步,小麦产量水平获得了持续提高,高产小麦产量已达到 8.7 t/hm^2 ^[2]。在小麦产量提高的同时,麦季的肥料施用量也在逐步增加,部分高产麦田的纯氮施用量达到 360 kg/hm^2 ^[3]。据报道,我国小麦等主要作物的氮肥利用率只有 30% 左右,远低于发达国家水平^[4]。农田大量施用氮肥,除了增加生产成本、降低经济效益外^[5],也带来了诸多环境问题,如加速土壤酸化^[6-7]、加剧农田温室效应^[8]、增加农业生产的面源污染风险^[9-10]等。前人关于麦田化肥减量增效技术的研究,主要集中在秸秆还田^[11]、适期播种^[12]、合理密植^[13]、优化肥料运筹^[14]、有机无

收稿日期:2021-10-12

基金项目:江苏省重点研发计划(现代农业)项目(编号:BE2019377);镇江市农技推广项目[编号:ZJNJ(2020)03]。

作者简介:刘德坤(1983—),男,江苏滨海人,硕士,高级农艺师,研究方向为稻麦优质绿色栽培与植物保护。E-mail:cola520@126.com。

通信作者:刘红江,博士,副研究员,主要从事农业生态和稻麦栽培生理生态研究。E-mail:LiuHongjiang2004@sohu.com。

[25]徐国伟.种植方式、秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量与品质的影响及其生理的研究[D].扬州:扬州大学,2007:83-85.

[26]李 杰.不同种植方式水稻群体生产力与生态生理特征的研究[D].扬州:扬州大学,2011:137-139.

[27]王春雨.不同种植方式下氮素水平对杂交籼稻根系形态及养分吸收特性的影响[D].雅安:四川农业大学,2018:47-48.

[28]甘曼琴,刘佩诗,黄 瑜,等.稻田氮磷流失控制技术[J].环境监测管理,2020,32(2):8-11,21.

[29]Cai S, Shi H, Pan X H, et al. Integrating ecological restoration of agricultural non-point source pollution in Poyang Lake Basin in China[J]. Water, 2017, 9(10):745.

[30]晏 军,吴启侠,朱建强,等.基于稻田控水减排的氮肥运筹试验研究[J].水土保持学报,2018,32(2):229-236,245.

[31]张岳芳,陈留根,王子臣,等.稻麦轮作条件下机插水稻 CH_4 和 N_2O 的排放特征及温室效应[J].农业环境科学学报,2010,29(7):1403-1409.

[32]马永跃.品系、施肥和栽培方式对福州平原稻田甲烷和氧化亚氮通量的影响[D].福州:福建师范大学,2013:55-56.

[33]林 芳,王 纯,王维奇,等.栽培方式对福州平原稻田氧化亚氮减排的研究[J].实验技术与管理,2014,31(6):58-62.

[34]曹云英,朱庆森,郎有忠,等.水稻品种及栽培措施对稻田甲烷排放的影响[J].江苏农业研究,2000,21(3):22-27.

机肥配施^[15]和施用新型肥料^[16]等方面。而在机条播小麦条件下,采用机械深施基肥措施,减少氮肥施用量,以提高麦季氮肥利用效率方面的研究报道较少。因此,本研究于 2015—2016 年度和 2016—2017 年度麦季在江苏省金湖县吉庄水稻种植专业合作社试验田,通过设置不施用氮肥、当地农民常规氮肥运筹和减少 15% 氮肥施用量 3 个处理,探索结合机械条播条件下,深施基肥对小麦产量构成因素及麦季氮肥吸收利用的影响,以期为我国小麦生产提高经济效益和提升农业生态环境质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2015 年 11 月至 2017 年 6 月连续 2 个麦季在江苏省淮安市金湖县陈桥镇吉庄水稻种植专业合作社试验田(118°59'E, 33°09'N)开展,该地为亚热带湿润季风气候,年平均温度 14.6℃左右,年平均降水约 110 d,年均降水量约 1 100 mm,年日照时长 2 100 h 左右,年均无霜期约 220 d,轮作方式为麦—稻两熟。试验土壤为黄泥土,其主要理化性状为:有机质含量 22.38 g/kg、全氮含量 1.63 g/kg、速效氮含量 45.13 mg/kg、总磷含量 0.57 g/kg、速效磷含量 18.23 mg/kg、速效钾含量 162.01 mg/kg、容重 1.25 g/cm³、pH 值 6.52。

1.2 试验处理

上季水稻收获时,将秸秆切碎匀铺再用中拖耕翻还田。试验设空白对照(0N)处理,不施用氮肥,磷肥和钾肥施用量均为 112.5 kg/hm²,磷、钾肥在小麦播种时全部采用人工基施,小麦播种方式也为人工撒播。

采用走访和问卷调查相结合的前提下,设置当地农民常规施肥水平处理(FN),施用纯氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥分别为 300.0、112.5、112.5 kg/hm²。小麦采用人工撒播,氮肥运筹同农民常规施肥,按时间顺序基肥 40%(11 月 6 日)、返青肥 20%(翌年 2 月 10 日)、拔节肥 20%(翌年 3 月 5 日)和孕穗肥 20%(翌年 4 月 3 日)进行人工撒施,磷肥和钾肥均作为基肥人工撒施。

在农民常规施肥量(FN)基础上,减少 15% 的施氮量(RN),即氮肥、磷肥、钾肥施用量分别为 255.0、112.5、112.5 kg/hm²,机械条播小麦,行距为 20 cm,氮肥运筹按照基肥 60%(11 月 6 日)、拔节肥

10%(翌年 3 月 5 日)、穗肥 30%(翌年 4 月 3 日)的比例运筹,磷肥和钾肥全部基施,采用太仓项氏农机有限公司生产的“六位一体”化机械,机条播小麦同步机械深施基肥,拔节肥和穗肥人工撒施。本试验共 3 个处理组合,即 0N、FN、RN。

2015—2016 年度和 2016—2017 年度,2 季小麦播种时间均为 11 月 6 日,播种量 225.0 kg/hm²。供试小麦品种为扬麦 19。试验用肥为含 15% N、15% P₂O₅、15% K₂O 的复合肥,氮、磷、钾肥不足部分用含 46.2% N 的尿素、含 12% P₂O₅ 的过磷酸钙、含 60% K₂O 的氯化钾补齐。各试验小区 500.0 m²,设置 3 次重复。麦田日常管理同当地优质高产小麦栽培方法一致。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 小麦生物产量 小麦成熟期,各小区在小麦长势均衡的位点,分别调查 2 个 1 m² 小麦穗数,折算平均穗数,据此取样 20 株,分别测定植株的茎鞘、叶片和穗等器官干物质质量(105℃杀青 30 min 后,于 70℃下烘干至恒质量),计算小麦生物产量。

1.3.2 小麦产量及其构成因素 各小区分别调查 2 个 1 m² 小麦穗数,折算平均穗数;据此取样 20 株调查每穗平均粒数,测定千粒质量;计算理论产量。

1.3.3 植株氮素含量 将小麦成熟期样品按茎鞘、叶片和穗分别粉碎、消煮、定容后,用半微量蒸馏—滴定法测定植株全 N 含量^[17]。

1.3.4 土壤速效氮素含量 在小麦拔节、抽穗和成熟 3 个时期,各小区选 3 个采样点,取 0~20 cm 深度的耕作层土样,混匀后放置于自封袋,暂存在保鲜盒中,随即带回实验室分成小块,将植物根系及石子等用镊子挑出,待检。用浓度为 2 mol/L 的氯化钾浸提后,采用分光光度计比色法分别测定土壤铵态氮和硝态氮含量^[18]。将各处理 3 个采样点的测得值平均,得到测定值。

1.3.5 氮肥吸收利用率 氮肥处理区在扣除空白区本底小麦籽粒产量后施用单位氮肥所增产的谷物产量为氮肥农学利用率(kg/kg);小麦氮肥施用区在扣除空白区本底吸氮量后占比氮肥投入量的多少为氮肥吸收利用率(%);氮肥处理区小麦产量和氮素累积量在同步减掉空白本底小麦产量和氮素累积量后之间的比值为氮肥生理利用率(kg/kg);各氮肥处理区小麦产量与其纯氮施用量的比值为氮肥偏生产力(kg/kg)^[19-20]。

籽粒产量除以全株吸氮量为小麦氮素籽粒生

产效率(g/g);籽粒吸氮量除以全株吸氮量为小麦氮素收获指数。

1.4 数据分析方法

试验数据用 Excel 2007 整理并制图,用 SPSS 13.0 软件进行处理间差异显著性检验。不同处理间差异用(*LSD*)最小显著差数法进行判定,大于 $LSD_{0.05}$ 和 $LSD_{0.01}$ 标准的分别被认为差异显著和极显著。

2 结果与分析

2.1 基肥深施减氮条件下小麦产量及构成

如表 1 所示,有效穗数方面,小麦有效穗数在年度间差异显著;基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理平均下降 7.83%,2 个处理差异显著。每穗粒

数方面,2015—2016 年度基肥深施减氮处理与农民常规施肥处理差异不大;2016—2017 年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理增加 6.87%,处理间的差异达显著水平。千粒质量方面,年度间小麦千粒质量差异显著;基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理平均增高 4.03%,处理间的差异达显著水平。

不施氮肥处理小麦产量最低,比农民常规施肥平均下降 46.14%。与农民常规施肥相比较,氮肥施用量减少 15% 条件下机械深施基肥,2015—2016 年度小麦产量增加 0.80%,2016—2017 年度小麦产量降低 2.13%,处理间的差异均不显著;2016—2017 年度小麦产量比 2015—2016 年度小麦产量显著降低,主要是因为 2016—2017 年度小麦千粒质量显著降低。

表 1 基肥深施减氮条件下小麦产量及构成

年度	处理	有效穗数 (个/m ²)	每穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)	产量 (g/m ²)
2015—2016	ON	396.2 ± 3.62e	23.8 ± 0.38d	41.3 ± 0.21bc	389.2 ± 6.60c
	FN	554.9 ± 13.67b	29.7 ± 0.75b	41.7 ± 0.26b	688.0 ± 6.13a
	RN	528.4 ± 17.10c	30.0 ± 0.51b	43.8 ± 0.30a	693.5 ± 7.88a
2016—2017	ON	323.8 ± 5.25f	25.9 ± 0.36c	40.3 ± 1.15d	338.2 ± 2.15d
	FN	570.0 ± 12.77a	29.1 ± 0.95b	39.8 ± 0.55d	661.2 ± 11.01b
	RN	508.0 ± 6.08d	31.1 ± 0.25a	41.0 ± 0.36c	647.1 ± 10.48b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下表同。

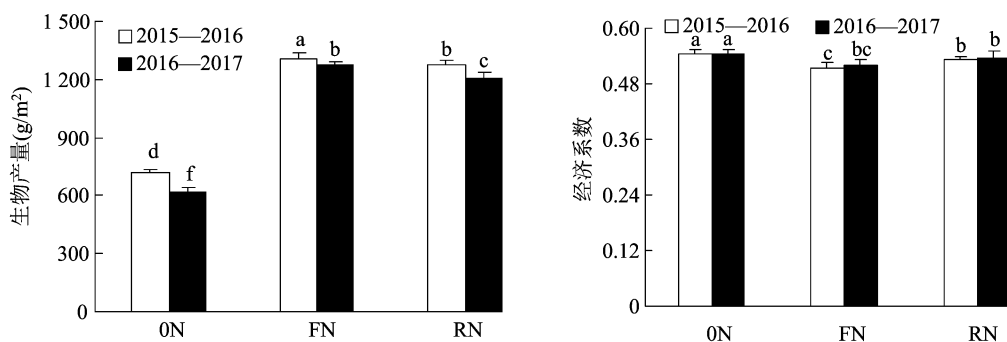
2.2 基肥深施减氮条件下小麦生物产量和经济系数

如图 1 所示,2015—2016 和 2016—2017 年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理小麦生物产量分别下降 2.85% 和 5.26%,不同年度处理间的差异均达显著水平;不同年度间小麦生物产量差异显著。小麦的经济系数以农民常规施肥处理最低,不施氮肥处理最高;2015—2016 和 2016—2017 年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理小麦经济

系数分别提高 3.43% 和 3.30%,2015—2016 年度处理间差异均达显著水平;不同年度间小麦经济系数差异不明显。小麦籽粒产量是其生物产量与经济系数的乘积。虽然,小麦生物产量基肥深施减氮处理显著低于农民常规施肥处理,但是其经济系数显著增加,因此能保证其产量不减。

2.3 基肥深施减氮条件下小麦氮素积累量

如图 2 所示,2015—2016 年度氮肥减量处理小麦氮素积累量比农民常规施肥处理提高 7.11%,



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同

图1 基肥深施减氮条件下小麦生物产量和经济系数

2016—2017 年度氮肥减量处理小麦氮素累积量比农民常规施肥处理降低 0.58%,2015—2016 年度处理间的差异达到显著水平;年度间小麦氮素累积量差异显著。

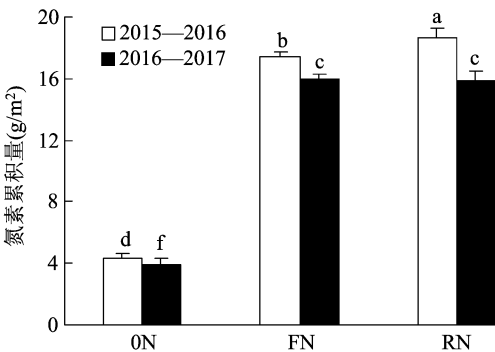
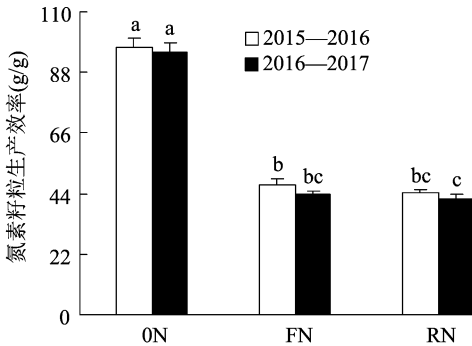


图2 基肥深施减氮条件下小麦氮素累积量



2.4 基肥深施减氮条件下小麦氮素效率及收获指数

如图3所示,2015—2016和2016—2017年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理小麦氮素籽粒生产效率分别降低6.11%、3.30%,不同处理间差异未达显著水平;小麦氮素籽粒生产效率年度间差异也不显著。小麦氮素收获指数方面,2015—2016和2016—2017年度氮肥减量处理比农民常规施肥处理分别提高1.63%、0.61%,处理间的差异均未达显著水平;年度间农民常规施肥处理小麦氮素收获指数差异显著。小麦氮素收获指数为小麦籽粒中所含氮素占地上部分氮素累积量的比例。氮肥减量处理提高了小麦氮素收获指数,说明通过氮肥减量处理能够促进小麦植株氮素向籽粒中运转。

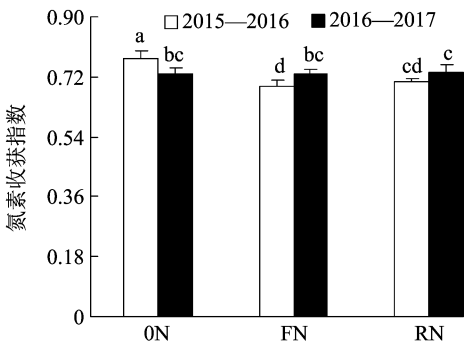


图3 基肥深施减氮条件下小麦氮素籽粒生产效率及收获指数

2.5 基肥深施减氮对小麦氮素利用率的影响

如表2所示,2015—2016和2016—2017年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理小麦氮肥农学利用率分别提高19.78%和12.55%,处理间的差异均达显著水平;年度间基肥深施减氮处理小麦氮肥农学利用率差异不显著。2015—2016和2016—2017年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理小麦氮肥吸收利用率分别提高28.82%和16.75%,处理间的差异均达显著水平;小麦氮肥吸收利用率年度间差异也达显著水平。2015—2016和2016—2017年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理

小麦氮肥生理利用率分别下降6.97%和3.64%,处理间的差异均达显著水平;2016—2017年度小麦氮肥生理利用率显著大于2015—2016年度。2015—2016和2016—2017年度基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理小麦氮肥偏生产力分别提高18.58%和15.11%,处理间的差异均达显著水平;小麦氮肥偏生产力年度间差异显著。综上,通过基肥深施以及合理肥料运筹,施用氮肥量减少15%能够提高小麦氮肥农学利用率、吸收利用率以及氮肥的偏生产力。

表2 基肥深施减氮对小麦氮素利用率的影响

年度	处理	氮肥农学利用率 (kg/kg)	氮肥吸收利用率 (%)	氮肥生理利用率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)
2015—2016	FN	9.96 ± 0.14c	43.41 ± 0.79c	22.94 ± 0.15c	22.93 ± 0.10c
	RN	11.93 ± 0.38a	55.92 ± 0.49a	21.34 ± 0.74d	27.19 ± 0.15a
2016—2017	FN	10.76 ± 0.40b	39.99 ± 1.42d	26.92 ± 0.23a	22.04 ± 0.37d
	RN	12.11 ± 0.34a	46.69 ± 0.87b	25.94 ± 0.30b	25.37 ± 0.41b

2.6 基肥深施减氮条件下土壤速效氮素养分

如表 3 所示,随着小麦生长发育的进展,基肥深施减氮和农民常规施肥处理土壤速效氮素养分的动态曲线均表现出先增加再减少开口向下抛物线的二次函数关系,这可能与试验年度麦季氮肥运筹模式相关。基肥深施减氮处理比农民常规施肥处理麦田土壤速效氮含量,在小麦拔节、抽穗和成熟期分别提高 7.49%、10.07% 和 8.83%,处理间差异显著。说明麦季通过机械深施基肥的同时减少氮肥使用量,在小麦生育中、后期仍然维持较高的麦田土壤速效氮素含量,保证小麦的生长发育和产量形成。

表 3 基肥深施减氮条件下麦田土壤速效氮素养分含量

处理	土壤速效氮含量 (mg/kg)		
	拔节	抽穗	成熟
ON	78.5c	71.3c	42.2c
FN	114.8b	119.2b	72.5b
RN	123.4a	131.2a	78.9a

3 讨论与结论

氮素是小麦生长发育和产量形成的重要营养元素。但超量投入氮肥,不仅不会提高小麦产量,还会增加生产成本,降低氮肥吸收利用率^[21-22]。影响麦季氮肥施用量的主要因素有小麦品种、土壤肥力、气候条件、降水量、目标产量等。此外,通过改进施肥方式,可以实现小麦氮肥减量,提高肥料利用效率,确保小麦高产稳产。麦季不同耕作模式研究表明,轮耕处理有利于提高田间土壤的保水保肥能力,提高小麦的干物质累积量和谷物产量,2 年深松结合 1 年免耕处理增产效果尤为显著^[23]。采用缓控释氮肥替代普通尿素,在减少 20% 氮肥施用量时,能够保证小麦高产稳产,并提高麦季氮肥吸收利用效率和小麦生产的经济效益^[24]。增施有机肥能够有效改善生育中后期土壤水分状况,提高氮肥利用效率,增加地上部生物量的积累,使小麦产量提高 9.1%^[25-26]。本研究表明,机械深施基肥条件下,将氮肥施用量减少 15%,小麦产量和农民常规施肥大致持平,使氮肥吸收利用率提高了 22.8%。说明通过改进农艺管理措施,在实现麦季氮肥减量的同时,保证了小麦籽粒产量,提高了氮肥利用效率,本研究与前人的结果^[24]基本一致。主要是因为将小麦基肥深施,减少麦季氮肥随降雨产生地表径流流失风险,同时避免肥料表施后形成氨

挥发和氧化亚氮等气态损失^[27],从而提高了氮素肥料利用效率。

从小麦氮肥吸收利用率来看,四川盆地小麦氮肥减量试验 2 年的研究表明,与习惯施肥相比,减少 50% 氮肥施用量仍可维持小麦产量,并使小麦氮肥吸收利用率提高 69.1%,氮肥偏生产力提高 79.2%,但也导致土壤氮素亏缺,需注意土壤养分平衡问题^[28]。渭北旱塬有机无机肥配施,在降低 27.1% 氮肥投入量条件下,可以使小麦产量提高 14.7%,其中 150 kg/hm² 化学氮肥施用量配施有机肥处理小麦氮肥吸收利用率为最高,达到 42%^[29]。本研究结果显示,与农民常规施肥比较,机械深施基肥条件下,将施氮量减少 15%,小麦氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力分别平均提高 16.17%、22.79% 和 16.85%。本研究小麦氮肥吸收利用率明显小于前人的研究结果^[27-28],主要是因为本研究氮肥减量的幅度明显小于前人的研究,减少了氮肥被当季小麦的吸收比例。

关于麦田养分管理对土壤肥力的影响,温延臣等研究表明,通过商品有机肥部分替代化肥,减少化学氮肥的施用量,施用 3 年后,能确保小麦产量不减,并能够培肥地力,使土壤全氮含量提高 12.3%^[30]。本研究表明,与农民常规施肥相比较,机械深施基肥,氮肥施用量减少 15%,小麦产量不减,麦田土壤速效氮含量在小麦不同生育时期均得到显著提高。说明通过改进施肥方式,机械深施基肥,将氮肥施用量减少 15%,可提高麦季氮肥吸收利用效率,保证小麦高产稳产,同时保持麦田土壤肥力不减,有利于农业生产节本增效和可持续发展。氮肥减量 50% 的研究表明,经过连续 2 季的试验,虽然能保证小麦产量不减,但是土壤氮素盈余为 -30.2 kg/hm²,土壤氮素出现了较大幅度亏缺^[27]。表明需要在确保土壤养分平衡条件下减施氮肥,以维持长期地力,减量幅度不宜过大。而连续 4 季的研究表明,通过施用控释氮肥减氮 30%,较常规施用化肥处理对小麦产量和麦田土壤氮素养分状况无显著影响^[31]。说明本研究如果采用缓控释氮肥替代普通化肥,并通过机械深施,可能会进一步减少麦季氮肥施用量,具体减量幅度有待于进一步研究。

在苏北平原,与当地农民常规种植小麦方式相比较,通过使用播种施肥一体化机械条播小麦的同时深施小麦基肥,并降低 15% 的化学氮肥投入量,

能够提高小麦的氮素吸收利用率,保证小麦生长发育的氮素养分供应,获得小麦的高产稳产,并维持地力不减。麦季采用播种施肥一体化机械作业可以减少麦田氮肥的投入量,降低农业生产劳动强度,减轻农业面源污染风险,具有推广应用前景。关于播种施肥一体化机械作业对小麦生产经济效益和生态效益的影响,有待于进一步研究和评估。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2018.
- [2] 张珂珂,周苏政,张 嫚,等. 减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(3):863–872.
- [3] 张文静,江东国,黄正来,等. 氮肥施用对稻茬小麦冠层结构及产量、品质的影响[J]. 麦类作物学报,2018,38(2):164–174.
- [4] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、存在问题和对策[C]//李庆逵,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌:江西科学技术出版社,1998:38–51.
- [5] 李丰丰,朱红英,段建设,等. 肥料无机有机配施对稻茬小麦产量与肥料利用率的影响[J]. 麦类作物学报,2018,38(5):593–599.
- [6] Gu L M, Liu T N, Zhao J, et al. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(2):374–388.
- [7] 孟红旗,吕家珑,徐明岗,等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(5):1153–1160.
- [8] Cai Y J, Ding W X, Luo J F. Nitrous oxide emissions from Chinese maize–wheat rotation system: a 3–year field measurement[J]. Atmospheric Environment, 2013, 65:112–122.
- [9] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. PNAS, 2009, 106(9):3041–3016.
- [10] Dai J, Wang Z H, Li M H, et al. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: long–term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2016, 196:180–190.
- [11] Zhao H, Sun B F, Lu F, et al. Straw incorporation strategy on cereal crop yield in China[J]. Crop Science, 2015, 55(4):1773–1781.
- [12] 杨永乐,金彦刚,任仰涛,等. 播期、密度和氮肥运筹对瑞华麦520产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(3):348–354.
- [13] 吴 鹏,李福建,于倩倩,等. 耕作与播种方式、密度和施氮量对稻茬小麦幼苗质量的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(1):72–80.
- [14] 吴晓丽,李朝苏,汤永禄,等. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(6):1889–1898.
- [15] Wei W L, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: an integrated analysis of long–term experiments[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 225:86–92.
- [16] 刘红恩,李金峰,刘世亮,等. 施用控释BB肥对冬小麦产量、氮素累积和氮肥利用率的影响[J]. 西北农业学报,2017,26(9):1311–1316.
- [17] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen–total[M]//Page A L. Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1982:595–624.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 刘立军,桑大志,刘翠莲,等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(12):1456–1461.
- [20] 胡雅杰,朱大伟,邢志鹏,等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):12–22.
- [21] 杜 盼,张娟娟,郭 伟,等. 施氮对不同肥力土壤小麦氮营养和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(2):176–186.
- [22] 季诗域,王旭东,石思博,等. 稻秆还田与化肥配施对稻茬麦田土壤肥力和小麦产量的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(5):1181–1188.
- [23] 侯贤清,李 荣,贾志宽,等. 西北旱作农田不同耕作模式对土壤性状及小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(5):1146–1157.
- [24] 谭德水,林海涛,朱国梁,等. 黄淮海东部冬小麦一次性施肥的产量效应[J]. 中国农业科学,2018,51(20):3887–3896.
- [25] 尹嘉德,侯慧芝,张绪成. 增施有机肥对全膜覆土穴播春小麦水分利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2019,39(2):179–185.
- [26] 毛 伟,曾洪玉,李文西,等. 不同土壤肥力下有机氮部分替代化学氮对小麦产量构成及土壤养分的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(5):1189–1196.
- [27] 张英鹏,李洪杰,刘兆辉,等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦—玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(4):1179–1187.
- [28] 赵亚南,宿敏敏,吕 阳,等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):864–873.
- [29] 马 臣,刘艳妮,梁 路,等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(4):1240–1248.
- [30] 温延臣,张曰东,袁 亮,等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(11):2136–2142.
- [31] 孙云保,张 民,郑文魁,等. 控释氮肥对小麦—玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):115–121.