

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.04.29

缓释氮肥施用比例对冬小麦产量及 氮肥利用效率的影响

邹奇芳, 谷晓博, 李援农, 陈朋朋, 曹俊豪

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对陕西关中小麦肥料利用效率不高的问题,在陕西省杨凌示范区开展了缓释氮肥与尿素的配施试验,设置了不施氮肥(N0)、100%尿素(N1)和4个不同缓释氮肥配施处理(N2(100%)、N3(25%)、N4(50%)、N5(75%)),以不施肥CK为对照;分析缓释氮肥与尿素配施对冬小麦干物质累积及氮素吸收量、土壤硝态氮含量和分布、产量及水氮利用效率的影响。结果表明:与N1、N2处理相比,缓释氮肥和尿素配施不仅能显著增加冬小麦干物质累积量(4.69%~11.40%)、氮素吸收量(5.92%~24.08%)及产量(6.00%~22.41%),还能增加土壤表层(0~40 cm)的硝态氮累积量(2.09%~45.51%),减少其淋失到深层土壤,提升氮肥利用效率。N5处理下冬小麦的氮肥偏生产力(42.46 kg/kg)、氮肥农学利用率(15.46 kg/kg)和氮肥表观利用率(47.79%)均最大,成熟期N5处理的干物质累积量较N1和N2处理分别提高了11.40%和9.20%,地上部氮素累积量分别提高了24.08%和11.49%,产量分别提高了22.41%和11.00%。收获时N5处理0~40 cm土层中硝态氮的累积量最大,比其它施肥处理提高了1.30%~19.52%。综上所述,75%缓释氮肥+25%尿素处理(N5)是本研究中冬小麦高产高效的最优施肥方案。

关键词: 冬小麦; 缓释氮肥; 产量; 土壤硝态氮; 氮素利用率

中图分类号:S147.34

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)04-0217-08

Effects of slow-release nitrogen fertilizer application ratio on yield and nitrogen fertilizer utilization efficiency of winter wheat

ZOU Qifang, GU Xiaobo, LI Yuannong, CHEN Pengpeng, CAO Junhao

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Considering the low fertilizer utilization efficiency in Guanzhong, Shaanxi Province, the experiment for the combined application of slow-release nitrogen fertilizer and urea was carried out in Yangling, Shaanxi Province. Different combinations was set, namely, N0 (non-nitrogen fertilizer), N1 (100% urea), and four different fertilizer dosages including N2 (100% slow-release nitrogen fertilizer), N3 (25% slow-release nitrogen fertilizer + 75% urea), N4 (50% slow-release nitrogen fertilizer + 50% urea), N5 (75% slow-release nitrogen fertilizer + 25% urea), and the non-fertilization CK was used as the control. Subsequently, effects of the combined application of slow-release nitrogen fertilizer and urea on dry matter accumulation and nitrogen absorption of winter wheat, soil nitrate content and distribution, yield and utilization efficiency of water and nitrogen were analyzed. According to the results, compared with N1 and N2 treatments the combined application of slow-release nitrogen fertilizer and urea not only can significantly increase the dry matter accumulation (4.69% - 11.40%), nitrogen absorption (5.92% - 24.08%) and yield of winter wheat (6.00% - 22.41%), but also can enhance the content of nitrate nitrogen (2.09% - 45.51%) in the surface soil (0 - 40 cm), reduce its leaching to the deep soil and finally improve the nitrogen utilization efficiency. In addition, in N5 treatment, the partial productivity of nitrogen

收稿日期:2022-02-28; 修回日期:2022-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51979235)

作者简介:邹奇芳(1996-),女,重庆梁平人,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论研究。

通讯作者:李援农(1962-),男,陕西大荔人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术及3S技术应用研究。

fertilizer (42.46 kg/kg), agronomic utilization rate of nitrogen fertilizer (15.46 kg/kg), as well as the apparent utilization rate of nitrogen fertilizer (47.79%) of winter wheat were the highest. Moreover, compared with N1 and N2 treatments, the dry matter accumulation of N5 treatment increased by 11.40% and 9.20%, the above ground nitrogen accumulation increased by 24.08% and 11.49% and the yield increased by 22.41% and 11.00%, respectively. The residual amount of nitrate nitrogen in the N5 treatment of 0–40 cm soil layer was the largest at harvest time, which was increased by 1.30%–19.52% compared with other fertilization treatments. To sum up, the combination of 75% slow-release nitrogen fertilizer and 25% urea treatment is the best fertilization scheme for high yield and high fertilizer utilization efficiency of winter wheat.

Key words: winter wheat; slow-release nitrogen fertilizer; yield; soil nitrate nitrogen; nitrogen utilization efficiency

1 研究背景

作为我国第二大粮食作物,小麦在保障国家粮食安全方面发挥着非常重要的作用。据国家统计局2022年发布的统计资料显示^[1],2021年我国小麦产量为 1.37×10^8 吨,较2010年增长了17.97%。化肥的施用对小麦增产起着至关重要的作用,在全国小麦主要栽培区中,化肥对小麦增产的贡献率高达25.8%~43.6%^[2-3]。从1995年至2015年,粮食作物播种面积减小了19.3%,若需保障粮食产量的稳定增长,就需要提高作物的单产水平^[4]。大量田间试验研究表明粮食单产增加55%是化肥作用的效果^[5],合理施肥能使水稻、小麦、玉米三大粮食作物平均增产48%,为保障粮食增产和稳定做出了极大的贡献^[6]。

氮元素是影响植物生长发育及产量的重要营养元素,同时氮肥也是使用量最大的肥料之一^[7]。由于普通氮肥的肥效作用周期较短,不能在短时期内被作物全部吸收和利用^[8-9],导致其会以铵态氮或硝态氮的形式被土壤胶体吸附而留存于土壤中,存在较大的淋洗风险^[10];同时,实际农业生产中为了追求高产而过量施用氮肥^[11-12],各地因此而引发了大量面源污染,给农业生态环境带来了沉重负担,农业可持续发展面临严峻挑战^[13-14]。缓释氮肥因其能很好地将肥料养分释放速率匹配作物养分吸收速率,成为近年来化肥研究的主要对象之一。但施用缓释氮肥成本较高,普通农户接受程度较差,因此,考虑缓释氮肥与普通氮肥配施逐渐过渡至缓释氮肥单施是一种较为可行的缓释氮肥推广策略。顾睿^[15]研究表明,小麦施用缓释氮肥后可在改良土壤肥力的同时显著提高小麦的水氮利用效率,且小麦品质也得到改善。杨金宇等^[16]研究表明,缓释氮肥

配施尿素能调控小麦灌浆动态和产量构成,进而提高小麦产量。李援农等^[17-18]关于玉米缓释氮肥与尿素的配施研究表明,65%与100%的缓释氮肥处理,显著提高了玉米的产量及氮素利用效率。缓释氮肥与尿素的配比不同,对小麦的生长状况和生产效益的影响也存在一定差异。张嘉敏^[19]研究表明尿素与缓释氮肥掺施对夏玉米的中后期生长有促进作用,缓释氮肥与尿素3:1配施比其他处理使夏玉米产量增加了14.8%~60.1%,水分利用效率提高了2.9%~14.4%。

缓释氮肥与尿素配施在春玉米和夏玉米上的应用已有较多研究,但对关中地区冬小麦的研究还不够充分。本研究基于1年田间小麦试验,以不施肥为对照,设置缓释氮肥与尿素不同的配施比例,分析不同配施处理下冬小麦生长情况的变化规律,探究缓释氮肥-尿素配比对冬小麦产量以及水氮利用效率的影响,寻求更易于投入田间生产的配施方案,以期对关中地区冬小麦合理施肥提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 试验地概况

试验于2019年10月-2020年6月在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的灌溉试验站进行,试验站地属暖温带季风半湿润气候区,年均辐射总量为475.5 KJ/m²,多年平均气温为13.0℃,全年无霜期为210 d,年平均降水量为632 mm,降水年内季节分配不均匀,年平均蒸发量为1500 mm。试验地地下水埋深5 m以下,其向上补给量可忽略不计。试验地土壤为中壤土,田间土壤持水率为24%(质量含水率),表层土壤pH值为8.12,土壤容重为1.38 g/cm³。表层(0~20 cm)土壤养分状况如表1所示。

表1 试验地表层(0~20 cm)土壤养分状况

指标	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
含量	11.26	0.94	0.60	14.10	76.01	23.30	88.48

2019年10月-2020年6月试验站冬小麦生育期内气温和逐日降水量情况如图1所示。冬小麦生育期内的总降水量为149.5 mm,日平均降水量为0.66 mm,日平均气温为9.21℃。

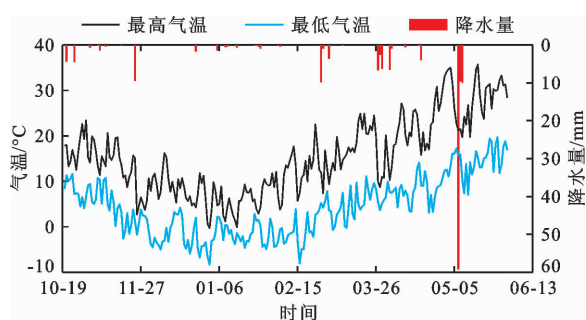


图1 2019年10月-2020年6月冬小麦生育期的气温和降水量变化

2.2 试验材料

试验所用冬小麦品种为“小偃22”,试验所用常规氮肥为普通尿素(N₂O₃≥46%),缓释氮肥为硫包衣尿素(N₂O₃≥37%);磷肥为过磷酸钙(P₂O₅≥16%);钾肥为农用硫酸钾(K₂O≥51%)。播种量为180 kg/hm²,施氮总量为180 kg/hm²,施磷总量为120 kg/hm²,施钾总量为135 kg/hm²。

2.3 试验设计

试验小麦于2019年10月19日播种,2020年6月1日收获。小麦采用人工条播,南北方向种植,行间距为20 cm,播种前采用机器翻耕。试验小区为16 m²(长4 m,宽4 m)。试验共设6个施肥梯度,分别为:不施氮(N₀)、100%尿素(N₁)、100%缓释氮肥(N₂)、25%缓释氮肥+75%尿素(N₃)、50%缓释氮肥+50%尿素(N₄)、75%缓释氮肥+25%尿素(N₅)。以不施肥处理作为对照处理,各试验处理施肥情况见表2。除CK处理外,其余各处理的磷肥和钾肥施入量均相同,且在冬小麦翻耕前一次性撒施。试验期间所有处理的冬小麦均未灌溉。为减小误差,每个处理设置3个重复,各小区间设置1 m间隔种植相同作物的保护带。各处理的病虫害防治、除草等相关农艺措施均与常规田间管理相同。

2.4 测定项目与方法

2.4.1 植物相关指标测定 (1)地上部干物质量:

在小麦苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期等5个生育期选取长势均匀的小麦植株30株,按照茎、叶、穗分离,于105℃杀青,时间为30 min,然后75℃恒温干燥至质量恒定后称重。

(2)产量:收获时在每个小区选取1 m²的样区小麦进行收割并测其穗数、穗长、穗粒数、千粒重,然后脱粒,风干至含水量为14%后称重。

(3)植株含氮量:将冬小麦地上部分按照茎、叶、穗分离后,干燥粉碎并过0.5 mm的筛网后称重,经浓硫酸消煮后用连续流动分析仪测定全氮含量。

2.4.2 土壤相关指标测定

(1)土壤含水量:采用烘干法测定土壤质量含水率,取土深度为100 cm,0~40 cm深度内取样间距为10 cm,40 cm以下取样间距为20 cm。

(2)土壤硝态氮含量:土壤取样方法与含水量测定的土壤取样法相同,取样后将土样经自然风干后磨碎过0.5 mm筛,用连续流动分析仪测定土壤的硝态氮含量。

表2 试验处理及具体施肥方案 kg/hm²

处理名称	具体施肥方案 (播种前两天一次性施入)	施肥种类		
		硫包衣 尿素	尿素	施氮折 纯量
CK	不施肥	0	0	0
N ₀	不施氮肥	0	0	0
N ₁	100%尿素	0	391	180
N ₂	100%缓释氮肥	486	0	180
N ₃	25%缓释氮肥+75%尿素	122	293	180
N ₄	50%缓释氮肥+50%尿素	243	196	180
N ₅	75%缓释氮肥+25%尿素	365	98	180

2.4.3 水、氮利用效率

(1)氮肥农学利用率(nitrogen agronomic efficiency, NAE)、氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen, PFPN)、氮肥表观利用率(utilization rate of nitrogen fertilizer, NUR)3项指标利用公式(1)~(3)计算^[20]:

$$NAE = (Y_N - Y_0)/F_N \quad (1)$$

$$PFPN = Y/F_N \quad (2)$$

$$NUR = (U_N - U_0) / F_N \times 100 \quad (3)$$

式中: NAE 为氮肥农学利用率, kg/kg ; Y_N 为施氮处理冬小麦的籽粒产量, kg/hm^2 ; Y_0 为不施氮处理冬小麦的籽粒产量, kg/hm^2 ; F_N 为施氮处理的施氮量, kg/hm^2 ; $PPFN$ 为氮肥偏生产力, kg/kg ; Y 为籽粒产量, kg/hm^2 ; NUR 为氮肥表观利用率, %; U_N 为施氮处理植株地上部氮素累积吸收量, kg/hm^2 ; U_0 为不施氮处理植株地上部氮素累积吸收量, kg/hm^2 。

(2) 水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 利用式(4) ~ (5) 计算^[21]:

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

$$ET = P + W_1 - W_2 + K - R \quad (5)$$

式中: WUE 为水分利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$; ET 为耗水量, mm ; P 为降水量, mm ; W_1 为播种前土层贮水量, mm ; W_2 为收获时土层贮水量, mm ; K 为地下

水补给量, mm , 本试验地地下水埋深在 5 m 以下, 可忽略; R 为径流, mm , 本试验小区四周起垄, 无径流, 可忽略。

2.5 数据处理

采用 Excel 2021 (Microsoft) 对试验数据进行整理和误差计算; 采用 SPSS20.0 (IBM) 软件中的单因素 ANOVA 进行统计分析, 显著性分析采用 Duncan 新复极差法, 用 OriginPro8.5 (OriginLab) 进行拟合和绘图。

3 结果与分析

3.1 缓释氮肥施用比例对冬小麦各生育期地上部干物质与氮素吸收量的影响

图 2 为冬小麦各处理地上部干物质累积量及氮素吸收量情况。

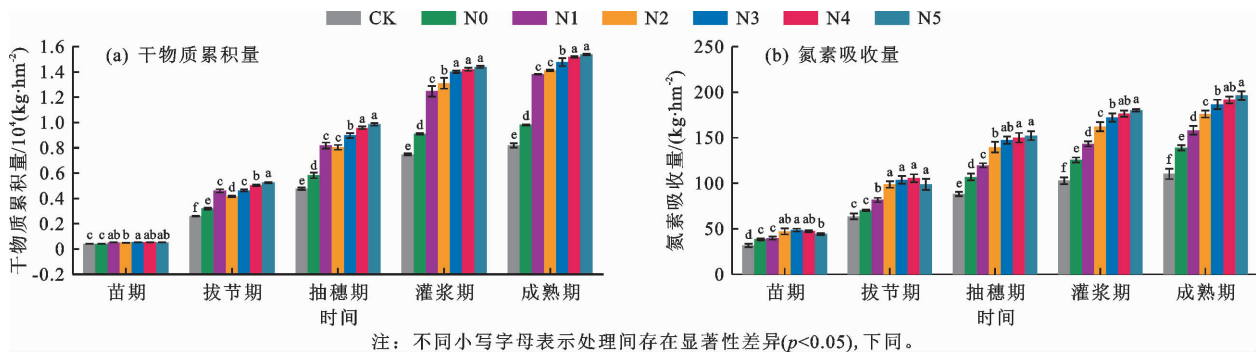


图 2 各处理冬小麦地上部干物质累积量及氮素吸收量变化

分析图 2(a) 可知, 各生育期施氮处理地上部干物质累积量均高于不施氮处理, 差异显著 ($p < 0.05$)。拔节期 N2 处理地上部干物质累积量比 N1 处理降低 9.35%, 差异显著 ($p < 0.05$), 抽穗期差距缩小到了 1.73%, 灌浆期 N2 处理比 N1 处理提高 5.00%, 成熟期干物质累积量 N2 处理比 N1 处理增加了 304.17 kg/hm^2 。单施缓释氮肥与单施尿素处理相比, 能够增加小麦的干物质累积量。在成熟期时, 缓释氮肥与尿素配施的 N3、N4、N5 处理与 CK 相比, 地上部干物质累积量分别提高了 80.51%、85.55%、87.94%, 同时较 N0 处理分别提高了 50.68%、54.89%、56.88%, 差异显著 ($p < 0.05$); N3、N4、N5 处理与 N1 处理相比, 地上部干物质累积量分别提高了 7.00%、9.99%、11.40%, 同时较 N2 处理, 分别提高了 4.69%、7.62%、9.20%, 差异显著 ($p < 0.05$)。缓释氮肥配施处理与单施尿素、缓释氮肥的处理相比较, 更能够有效促进冬小麦的干物质质量增加。

分析图 2(b) 可知, 冬小麦氮素吸收量随生育进程增加, 在成熟期达到最高值。施氮对冬小麦的氮素吸收有促进作用。冬小麦苗期时, N2、N3、N4、N5 处理的氮素吸收量较 CK、N0 处理显著提高 ($p < 0.05$)。冬小麦生长最为旺盛的阶段是拔节期, 这是植株营养生长的关键时期, 对氮素的需求量提高, 生物量增加迅速, 温度升高也促进了植株的生长以及氮素吸收, 拔节期施氮处理平均较 CK 提高 38.63%, 较 N0 处理提高 25.55%, 差异显著 ($p < 0.05$)。抽穗期氮素吸收量最低是 CK, 为 88.21 kg/hm^2 , 最高为 N5 处理, 为 152.24 kg/hm^2 。灌浆期氮素吸收量最低是 CK, 为 102.74 kg/hm^2 , 最高为 N5 处理, 为 180.04 kg/hm^2 , N5 处理氮素吸收量高于其他施氮处理 2.17% ~ 25.72%。成熟期施氮处理的冬小麦氮素吸收量比不施肥处理提高了 43.50% ~ 78.06%, 比不施氮肥处理提高了 12.27% ~ 41.44%; N3、N4、N5 处理与 N1 处理相比, 氮素吸收量分别增加了 17.89%、21.02%、24.08%; 同时与 N2 处理相比, 分别增加了

5.92%、8.73%、11.49%，差异显著 ($p < 0.05$)，氮素吸收量最大的为 N5 处理。缓释氮肥与尿素配施促进植株氮素吸收的效果更好。

3.2 缓释氮肥施用比例对冬小麦收获期土壤硝态氮分布和累积的影响

图3为各处理冬小麦成熟期0~100 cm土层硝态氮分布情况。由图3可知,0~100 cm的土壤硝态氮含量随土壤深度的增加均呈现先增大后减小的趋势。施用缓释氮肥的N2、N3、N4、N5处理硝态氮含量最大值均在20 cm土层的位置,然后随着土壤深度的增加开始逐渐减小,在深度100 cm处达到硝态氮含量的最低值,N2~N5处理的硝态氮主要集中在0~40 cm土层。单施尿素的N1处理硝态氮含量最大值出现在60 cm土层位置,然后随着土层深度的增加而降低,100 cm土层深度处,N1处理的土层硝态氮含量在所有处理中最大。

图4为各处理冬小麦成熟期0~100 cm土层硝态氮累积量。由图4可知,0~100 cm土层中各处理土壤硝态氮累积量由大到小依次为:N1处理、N2处理、N3处理、N4处理、N5处理、N0处理、CK。

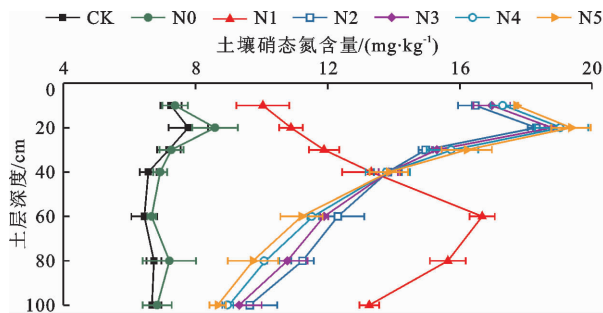


图3 各处理冬小麦成熟期0~100 cm土层硝态氮分布

3.3 缓释氮肥施用比例对冬小麦产量及构成因素的影响

表3为缓释氮肥施用比例对冬小麦的产量及其构成因素的影响试验结果。由表3分析可知,施加氮肥的处理与CK和N0处理相比,在单穗粒数、单位面积有效穗数、千粒质量、籽粒产量等方面有显著提高 ($p < 0.05$)。各处理的穗长为5.1~6.6 cm。N2、N3、N4、N5处理与N1处理相比较穗长显著增加了7.41%、8.10%、12.59%、13.79%,缓释氮肥与尿素配施的N3、N4、N5处理间无显著性差异。缓释氮肥与尿素配施可提高冬小麦的单穗粒数,N2、N3、N4、N5处理较N1处理单穗粒数显著增加了6.49%、8.74%、10.86%、11.36%,N4、N5处理间差异不显著。N3、N4、N5处理的千粒质量与其他处理

N2~N5处理0~100 cm土层硝态氮累积量显著高于CK与N0处理 ($p < 0.05$)。施用缓释氮肥的N2~N5处理0~40 cm土层中的硝态氮累积量随缓释氮肥施用比例的增加出现先增大后减小的趋势,0~100 cm土层中的硝态氮累积量随缓释氮肥施用比例的增加则出现了先减小后增大的趋势。N3、N4、N5处理0~40 cm土层硝态氮累积量较N1处理分别显著增加了40.68%、43.09%、45.51%;同时较N2处理也分别提高了2.09%、3.84%、5.60%,但差异不显著。N1处理0~40 cm土层硝态氮累积量最小为64.60 kg/hm²,占0~100 cm土层中硝态氮累积总量的33.61%;N5处理0~40 cm土层硝态氮累积量最大为94.00 kg/hm²,占0~100 cm土层中硝态氮累积总量的53.13%,较其他施用缓释氮肥处理高出了1.70%~31.81%;N1处理40~100 cm土层硝态氮累积量在所有处理中最大,为127.62 kg/hm²,占0~100 cm土层中硝态氮累积总量的66.39%;N5处理40~100 cm土层硝态氮累积量最小,为82.94 kg/hm²,占0~100 cm土层中硝态氮累积总量的46.87%。

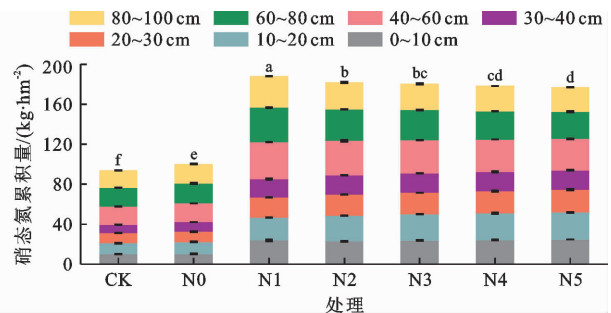


图4 各处理冬小麦成熟期0~100 cm土层硝态氮累积量

相比分别提高了12.43%~53.57%、14.66%~56.61%、14.91%~56.95%,N3、N4、N5处理中,N5处理千粒质量最大为41.69 g,N3处理最小为40.88 g,处理间差异不显著。施用氮肥的N1~N5处理与CK相比,施氮处理分别增产了11.71%~57.26%;同时与N0处理相比,施氮处理分别增产了11.71%~36.74%。缓释氮肥与尿素配施的N3、N4、N5处理与单施尿素的N1处理相比籽粒产量显著增加了16.38%、19.81%、22.41%;同时与N2处理相比,籽粒产量显著增加了5.76%、8.88%、10.10%。试验产量最高的处理为N5处理,其产量为7643 kg/hm²。各处理产量从大到小依次为:N5 > N4 > N3 > N1 > N2 > N0 > CK。可见,缓释氮肥与尿素配施对冬小麦产量及其构成因素有显著影响。

3.4 缓释氮肥施用比例对冬小麦水、氮利用效率的影响

表4为缓释氮肥施用比例对冬小麦水、氮利用效率的影响试验结果。由表4分析可知,缓释氮肥与尿素配施可以提高冬小麦的水分利用效率,差异显著($p < 0.05$)。N1、N2、N3、N4和N5处理的水分利用效率分别比CK提高了50.08%、55.29%、62.07%、64.69%和66.12%,分别比N0处理提高了12.06%、15.95%、21.01%、22.97%和24.04%,差异显著($p < 0.05$)。N3、N4、N5处理与N1、N2处理相比,水分利用效率显著提高($p < 0.05$),N3、N4、N5处理分别比N1处理提高了16.38%、19.81%、22.41%,分别比N2处理提高了5.76%、8.88%、11.24%,N3处理和N4处理之间水分利用效率差异不显著,N4处理和N5处理之间水分利用效率差异不显著,N3处理和N5处理之间水分利用效率差异显著($p < 0.05$)。水分利用效率是衡量冬小麦生产潜力的重要指标,施用缓释氮肥的N2、N3、N4和N5处理中,随着缓释氮肥施用比例的增大,水分利用效率出现先增大后减小的趋势。各处理冬小麦水分利用效率表现为:N5 > N4 > N3 > N1 > N2 > N0 > CK。由此可见,缓释氮肥与尿素配施可提高水资源的利用效率,实现水资源的高效利用。

氮肥偏生产力反映了籽粒产量与施氮量之间的关系,氮肥偏生产力随缓释氮肥施用比例的增加与水分利用效率出现相同的趋势,氮肥偏生产力较高一定程度上表示着较高的产量,N2、N3、N4、N5处理

的氮肥偏生产力比N1处理提高了10.04%、16.38%、19.81%、22.41%,差异显著($p < 0.05$),反映出缓释氮肥的有效性高于尿素。氮肥农学利用率反映了生产力潜量。N2、N3、N4和N5处理的氮肥农学利用率为11.17~15.46 kg/kg,各处理间差异显著($p < 0.05$),分别比N1处理提高了45.25%、73.86%、89.33%、101.04%。可见施用缓释氮肥能够提高氮肥的农学利用率。氮肥表观利用率反映了当季作物对氮肥的回收情况,N2、N3、N4和N5处理的氮肥表观利用率与N1处理相比,分别增加了37.28%、59.02%、69.33%、79.44%,差异显著($p < 0.05$),与单施缓释氮肥或尿素相比,缓释氮肥与尿素配施更有利于氮肥表观利用率的提高。氮肥偏生产力、氮肥农学利用率以及氮肥表观利用率表现为:N5 > N4 > N3 > N1 > N2 > N0 > CK。

表3 缓释氮肥施用比例对冬小麦产量及其构成因素的影响

处理	穗长/ cm	单穗 粒数	单位面积 穗数/m ²	千粒质 量/g	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)
CK	5.1c	33.3e	338.7f	26.62e	4860.1f
N0	5.2c	34.0e	405.3e	28.86d	5589.3e
N1	5.8b	39.3d	524.7d	34.84c	6243.7d
N2	6.2a	42.0c	546.7c	36.36b	6870.7c
N3	6.3a	43.0b	563.3b	40.88a	7266.3b
N4	6.5a	44.0a	631.7a	41.69a	7480.7ab
N5	6.6a	44.3a	644.3a	41.78a	7643.0a

注:各列不同字母表示处理间存在显著性差异($p < 0.05$)。

表4 缓释氮肥施用比例对冬小麦水、氮利用效率的影响

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥表观 利用率/%
CK	4860.1f	19.14f			
N0	5589.3e	22.01e			
N1	6243.7d	24.58d	34.69e	7.69e	26.63 e
N2	6870.7c	27.05c	38.17d	11.17d	36.56 d
N3	7266.3b	28.61b	40.37c	13.37c	42.35 c
N4	7480.7ab	29.46ab	41.56b	14.56b	45.10 b
N5	7643.0a	30.09a	42.46a	15.46a	47.79 a

注:各列不同字母表示处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。

4 讨论

4.1 缓释氮肥施用比例对冬小麦地上部干物质累积量的影响

干物质积累及分配是反映作物籽粒产量及生长

状况的重要指标,是产量形成的物质基础^[20-21]。关于缓释肥增产增效的相关研究较多:张利^[18]研究表明,缓释氮肥处理与尿素处理相比,干物质累积量增幅为11.7%~16.6%;李磊等^[22]研究表明,缓释氮肥处理的植物干重比普通氮肥提高了20.7%;缓释

氮肥增加了小麦生长中后期的干物质积累^[23]。本研究表明,在苗期到拔节期,全部施用尿素的 N1 处理干物质累积量大于全部施用缓释氮肥的 N2 处理,在抽穗期两个处理干物质累积量无显著差异,在灌浆期与成熟期,施用缓释氮肥的处理干物质累积量较大。缓释氮肥具有相对较长的肥效,在小麦生长的中后期能较为充分的满足其养分需求,比速效氮肥更具有优势^[24]。本研究中单施缓释氮肥的 N2 处理在某个时期的养分供应存在不足,缓释氮肥与尿素配施的 N3~N5 处理中的尿素恰恰弥补了其不足,所以干物质累积量更多。

4.2 缓释氮肥施用比例对土壤硝态氮累积量的影响

戴健^[25]的研究表明,当季硝态氮累积量和施氮量存在抛物线关系,长年过量施氮会降低作物对当季施入氮肥的利用潜力。马臣等^[26]研究表明缓释氮肥参与的处理 0~40 cm 土层硝态氮累积量显著高于单施普通氮肥处理。李燕婷等^[27]研究表明,与传统施用普通肥相比,缓释复合肥土壤剖面硝态氮含量为 20%~70%,降低了地下水中氮的污染和氮肥流失。缓释氮肥施入土壤后转变为植物有效养分的速度比常规氮肥缓慢,可以逐渐被农作物吸收,提高了氮肥的利用效率,增加了作物产量,也减小了随灌水流失的氮肥对土壤的影响。本研究中,0~100 cm 土层硝态氮累积量随着土壤深度的增加均呈现出先增大后减小的趋势。缓释氮肥和尿素配施的 N3、N4、N5 处理的土层硝态氮主要集中在 0~40 cm 表层土壤,比起全部施用尿素的 N1 处理土层硝态氮累积量在 0~40 cm 土层中有所增加,与徐杰等^[28]的研究结果一致,该处理可提高氮肥利用效率,达到减少氮肥施用量的目的。全部施用尿素的 N1 处理随着生育期的推进,硝态氮含量峰值位置逐渐向土层深处移动。N1 处理的硝态氮含量最大值出现在 60 cm 土层位置,并且随着施肥年限的增加还会向土壤深处淋失,冬小麦的根系主要分布在 0~40 cm 土层深度内,很难被作物继续利用。

4.3 缓释氮肥施用比例对冬小麦产量的影响

氮素是植物生长所必需的营养元素,对小麦的籽粒产量有重要影响。氮素是影响作物产量的主要因素,由于土壤自身的氮素供应能力不足,采取施加外源氮肥的措施以满足小麦生长所需,促进小麦的生长^[29]。李伟等^[30]研究表明,50% 控释尿素的施肥处理是冬小麦增产增收效果最好的方案;张晨阳^[31]研究表明,60% 缓释氮肥是他的研究中最适合的掺施比例;郭金金等^[32]研究表明,施用等量的尿

素掺混缓释氮肥较普通尿素能显著促进植物的生长发育,植物的穗粒数、有效穗数、产量均显著提高;他们的研究中缓释氮肥与尿素的最优配比略有不同是因为施氮量以及土壤水分、气候、地理因素和品种等对产量也有影响。本研究中不施肥与不施氮肥处理的产量偏高,可能是因为受上一季作物种植残留的硝态氮影响。本研究表明缓释氮肥与尿素配施显著提高了冬小麦的穗粒数和千粒质量,且缓释氮肥与尿素按 3:1 的比例施用时效最为显著。

4.4 缓释氮肥施用比例对冬小麦氮肥利用及水分利用效率的影响

作物对土壤中氮肥的转化效果可以通过氮肥偏生产力、农学利用率和表观利用率反映出来,适宜的控释氮肥与普通氮肥的配施比例,不仅能在前期提供足够的氮素,也能保证小麦后期的氮素需求,氮肥可以促进小麦的叶片发育,提高叶绿素含量以及净光合速率,作物水分和养分利用能力也得到了提高,小麦灌浆后期植株的同化与吸收得到了加强,从而增加了小麦植株的氮素积累量^[16]。雷艳等^[33]认为,中氮处理水平下,水分利用效率受施氮量的影响明显,可以通过增加施氮量来达到提高水分利用效率的目的。对于干旱地区土壤水分含量较低条件下的作物种植,合理增加施氮可能更有利于水分利用效率的提高^[34]。本研究中,缓释氮肥与尿素配施处理的氮素利用率和水分利用效率比较高,随着缓释氮肥比例的增加,氮素利用率和水分利用效率出现先增加后减小的趋势,75% 的缓释氮肥与尿素配施的 N5 处理效果最好,全施尿素的 N1 处理效果较差,说明缓释氮肥与尿素配施对水氮利用效率的提高有增益效果,但过多的缓释氮肥比例会延缓冬小麦早期生长,出现弱苗等现象,一定程度上降低了水氮利用效率。由于本研究所有处理含氮量水平相同,因此以后的研究可以进一步探讨相同缓释氮肥配比不同施氮量处理下水分利用效率的变化。

5 结 论

(1) 缓释氮肥与尿素配施能显著增加冬小麦的地上部干物质累积量、产量和水氮利用效率,缓释氮肥与尿素按 3:1 配施(N5)的处理增产最为明显。

(2) 缓释氮肥与尿素配施能增加 0~40 cm 表层土壤硝态氮含量,减小其淋失到深层土壤的风险,硝态氮累积量与作物需肥规律相吻合。在缓释氮肥与尿素按 3:1 配施时,0~40 cm 表层土壤硝态氮累积量占比最大,0~100 cm 土层硝态氮累积量最少。

综合考虑,缓释氮肥与尿素按 3:1 配施(N5)的处理是本试验条件下冬小麦高产高效的最佳氮肥施用比例,可作为关中地区小麦施肥模式的参考。本文只考虑了怎样施用氮肥对作物的增产增效,但是在生产实践中产量不是唯一的标准,因此,在未来的研究中应结合经济效益与环境影响综合考虑。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 全国小麦产量[EB/OL]. [2022-03-20]. <https://data.stats.gov.cn/search>.
- [2] 司清林,高燕,彭涛,等. 中国化肥使用现状和小麦增产高效施肥研究进展[J]. 农业与技术,2015,35(12):30-31.
- [3] 白银萍. 西北地区粮食生产现状,存在问题及增产策略研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [4] 李娜. 陕西省三大粮食作物施肥效果及肥料利用率研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [5] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [6] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京:中国农业科技出版社,1986.
- [7] 谷晓博. 种植方式和施氮量对土壤环境及冬油菜产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [8] 李伟,李絮花,唐慎欣,等. 控释掺混肥对夏玉米产量及土壤硝态氮和铵态氮分布的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(6):68-71+91.
- [9] 赵晓. 种植模式与氮肥类型对冬小麦生长及水氮利用效率的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [10] 张维乐,戴志刚,任涛,等. 不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(7):1254-1266.
- [11] 吴立峰,张富仓,张鹏,等. 灌水和施氮对甘肃河西绿洲春小麦生长及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(7):55-63.
- [12] 吴立峰. 不同灌水和施氮对河西地区春小麦生长和水分利用的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [13] 李硕,王选,张西群,等. 猪场肥水施用对玉米-小麦农田氨排放、氮素利用与表观平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2019,27(10):1502-1514.
- [14] 田红琳,杨华,许明陆,等. 5种缓释肥在渝单8号玉米上的应用效果[J]. 江苏农业科学,2013,41(9):66-68.
- [15] 顾睿. 缓控释肥与尿素配施对淮北稻茬小麦产量、品质和氮肥利用的影响[D]. 扬州:扬州大学,2020.
- [16] 杨金宇,李援农,王凯瑜,等. 控释氮肥与普通尿素配施比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(3):442-452.
- [17] 李援农,张利,谷晓博,等. 缓释氮肥减施对夏玉米产量与氮肥利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(6):285-294.
- [18] 张利. 缓释氮肥减施对夏玉米产量与水氮利用效率的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] 张嘉敏. 尿素与缓释氮肥掺施对夏玉米生长和水氮利用的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [20] 银敏华. 集雨模式与氮肥运筹对农田土壤水热状况和作物水氮利用效率的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [21] 宋明丹,李正鹏,冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报,2016,32(2):119-126.
- [22] 李磊,王锐,纪立东,等. 氮肥施用量对酿酒葡萄初期生长及产量品质的影响[J]. 北方园艺,2016(21):32-36.
- [23] 杨俊刚,徐凯,佟二健,等. 控释肥料与普通氮肥混施对春白菜产量、品质和氮素损失的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3147-3153.
- [24] 刘敏,宋付朋,卢艳艳. 硫膜和树脂膜控释尿素对土壤硝态氮含量及氮素平衡和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):541-548.
- [25] 戴健. 旱地冬小麦产量、养分利用及土壤硝态氮对长期施用氮磷肥和降水的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [26] 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.
- [27] 李燕婷,李秀英,赵秉强,等. 缓释复混肥料对玉米产量和土壤硝态氮淋失累积效应的影响[J]. 中国土壤与肥料,2008(5):45-48.
- [28] 徐杰,王锡玖,薛艳芳,等. 缓控释氮肥减施对冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. 山东农业科学,2021,53(9):68-74.
- [29] 朱英杰,刘富启,张燕,等. 不同土壤条件下氮肥处理对小麦产量及品质的影响[J]. 作物杂志,2020(3):184-190.
- [30] 李伟,李絮花,董静,等. 冬小麦控释尿素与普通尿素的最佳配比研究[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(3):629-635.
- [31] 张晨阳. 缓释氮肥与尿素掺施比例对不同冬小麦产量和水氮利用的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [32] 郭金金,张富仓,闫世程,等. 缓释氮肥与尿素掺混对玉米生理特性和氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(5):1194-1204.
- [33] 雷艳,张富仓,寇雯萍,等. 不同生育期水分亏缺和施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报,2010,38(5):167-174+180.
- [34] 郑成岩,于振文,张永丽,等. 不同施氮水平下灌水量对小麦水分利用特征和产量的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2799-2805.