

灌水量及减氮模式对冬小麦产量
及水氮利用的影响

章 杰^{1,2}, 胡田田^{1,2}, 何 琼^{1,2}, 李鸿祥^{1,2}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;
2.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:为探究关中平原冬小麦合理的减氮模式及相应的灌水量,以灌水量为主处理、减氮模式为副处理开展冬小麦田间裂区试验,灌水量设 90 mm 和 150 mm,参照本地习惯施氮(尿素 CO,施氮量 210 kg·hm⁻²)设置减氮模式,施氮量为 150 kg·hm⁻²,有 3 种施氮类型:尿素+硝化抑制剂(DMPP)、控释氮肥和尿素掺施(PCU)和控释复合肥(SF),另以不施氮肥(N0)为对照,对小麦产量、水分和氮肥利用效率及土壤硝态氮残留状况进行分析。结果表明:灌水量和减氮模式两因素及其交互作用对冬小麦有效穗数、千粒重、籽粒产量、土壤硝态氮残留量及水分和氮肥利用效率均有显著影响;灌水量对冬小麦产量的影响随减氮模式而变,与灌水 90 mm 相比,PCU150 和 DMPP150 处理在灌水量 150 mm 时产量降低,SF150 和 N0 处理产量有所增大;灌水 90 mm 时,减氮模式 PCU150 和 DMPP150 较习惯施氮 CO210 减少施氮 28.6%,籽粒产量和有效穗数显著增加,分别增产 17.4%和 11.6%,水分利用效率提高 17.5%和 13.5%,氮肥利用效率增加 64.3%和 58.4%,0~200 cm 土层硝态氮残留量减少 57.8%和 45.6%。关中平原在冬小麦全生育期灌水 90 mm,采用尿素加硝化抑制剂基施、树脂包膜尿素基施 60%+尿素拔节期追施 40%两种减氮模式,冬小麦可维持较高产量和水肥利用效率。

关键词:冬小麦;灌水量;缓/控释氮肥;水氮利用;土壤硝态氮残留;产量;关中平原
中图分类号:S274.3;S143.1;S512.1 **文献标志码:**A

Effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer-reduction pattern
on yield and utilization of water and nitrogen of winter wheat

ZHANG Jie^{1,2}, HU Tiantian^{1,2}, HE Qiong^{1,2}, LI Hongxiang^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the reasonable nitrogen (N) fertilizer-reduction and suitable irrigation amount on winter wheat in Guanzhong Plain, a winter wheat field split plot experiment was carried out using irrigation amount as the main treatment and nitrogen fertilizer-reduction pattern as the sub-treatment. The irrigation amount was set to 90 mm and 150 mm. According to the local customary application of N (urea CO, 210 kg·hm⁻² N application rate), the N application rate of the N fertilizer-reduction pattern was set at 150 kg·hm⁻² N application rate, and there were three types of N application: urea plus nitrification inhibitor (DMPP), controlled release N fertilizer and urea mixed application (PCU) and controlled loss of fertilizer (SF), and a control (N0) without N. The wheat yield, water and N use efficiency, and soil nitrate N residual status were analyzed. The results showed that the two-factors of irrigation amount and N fertilizer-reduction pattern and their interaction had significant effects on available ear, 1 000-grain weight, grain yield, soil NO₃⁻-N residual amount, and water and nitrogen use efficiency. The effect of irrigation amount on winter wheat yield varied with N fertilizer-reduction pattern. Compared with 90 mm,

PCU150 and DMPP treatments reduced the yield when the irrigation volume was 150mm, and increased the yield of SF150 and N0 treatment. When the water was 90 mm, nitrogen fertilizer-reduction patterns PCU150 and DMPP150 decreasedN amount by 28.6%compared with the conventional N fertilizer pattern CO210, andthe grain yield and a-
vailable ear increased significantly, which increased yield by 17.4 and 11.6%, respectively; the water use efficien-
cy increased by 17.5% and 13.5%; N use efficiency increased by 64.3% and 58.4%; 0~200 cm soil NO₃⁻-N re-
sidual amount decreased by 57.8% and 45.6%, respectively.Winter wheat on Guanzhong Plain with 90mm irrigationduring
the whole growth period and N fertilizer-reduction patterns of urea plus nitrification inhibitors and 60% of resin coated u-
rea as basefertilizer and 40% of urea at jointing stage maintained optimum yield and water and fertilizer use efficiency.

Keywords: winter wheat; irrigation amount; slow/controlled release nitrogen fertilizer; water and nitrogen
utilization; soil nitrate nitrogen residue; yield; Guanzhong Plain

陕西省是我国粮食主产区之一,关中平原是陕
西省最大的粮食产地,该区小麦产量占全省总产量的
64%^[1]。施肥是保障现代农业生产的主要措施
之一,其中氮肥起关键作用^[2]。目前农户已养成
“高产就必须多施肥”的施肥习惯,关中平原小麦季
过量施氮约 55 kg · hm⁻²^[3-4]。这与该区小麦生产中
主要采用传统氮肥,且存在前期投入偏多、后期偏
少的问题有关^[5-6]。传统氮肥养分释放快,持续时
间短,肥料利用效率不高^[7],而且需要多次施用才
能与作物需肥特征相匹配,增加了肥料和劳动力投
入。缓/控释氮肥养分释放缓慢,肥效持续时间长,
能够协调养分供应与作物吸收之间的矛盾,可在作
物全生育期一次性基施^[8-9]。与传统氮肥相比,缓/
控释氮肥的合理减量施用不会影响作物生长及产
量,还能解决肥料利用效率低和农田环境破坏等问
题,是一种高效与环境友好型肥料^[10-12]。目前缓/
控释氮肥主要有物理型包膜控释肥、添加化学物的
缓释肥以及化学与物理包膜相结合的控释肥^[13],关
于缓/控释肥在玉米和水稻上的应用研究较多,对
于生育期更长的冬小麦的研究尚少^[14]。

水分和氮素是调控作物生长的两大要素^[15]。
程宪国等^[16]对不同水分水平下氮素对冬小麦生长
及产量影响的研究表明,水分缺乏会抑制作物养分
吸收与利用,最终导致营养不良;养分不足时冬小
麦生长缓慢,水分利用效率低。也有研究表明,当
灌水和施氮达到作物需求的阈值后,增加灌水或施
氮会显著降低冬小麦产量和水肥利用效率^[17-18]。
而且,灌水和施氮量间存在明显的相互作用,显著
影响作物生长及产量水平^[19-20]。因而,协调冬小麦
氮肥与水分管理具有重要的理论及实践意义。

基于以上考虑,本文选用硝化抑制剂、树脂包
膜尿素、控释复合肥 3 种氮肥缓/控释措施,形成不
同的减氮模式,设置不同灌水量,对关中平原冬小
麦开展裂区试验,对比习惯施氮与减氮模式,研究

灌水量及减氮模式对冬小麦产量及其构成因素、土
壤硝态氮残留和水肥利用效率的影响,为探索关中
平原冬小麦水氮高效管理模式提供依据,为缓/控
释氮肥的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验站概况

试验于 2017 年 10 月—2018 年 6 月在西北农林
科技大学节水灌溉试验站进行。该区位于 108°24'
E、34°20' N,海拔 524.7 m,全年无霜期 221 d,年平
均温度为 12.9 ℃,年平均降水量 580 mm(集中在 7、
8、9 月),年平均蒸发量 1 500 mm,属于暖温带季风
半湿润气候区。土壤质地为中壤土,2 m 土层内平
均土壤容重为 1.38 g · cm⁻³,0~1 m 土层的平均田
间持水量为 24%。供试土壤基本理化性状为:有机
质 12.02 g · kg⁻¹,速效磷 8.18 mg · kg⁻¹,碱解氮54.3
mg · kg⁻¹,全氮 0.91 g · kg⁻¹。气象资料由杨凌气象
站提供,试验期间冬小麦全生育期内降雨总量 185.5
mm,逐月降雨量见表 1。

表 1 冬小麦生育期降雨量及其分布
Table 1 Precipitation and the distribution during
winter wheat growth season

月份 Month	生长天数/d Growing days	降雨量/mm Precipitation
10	3	3.8
11	30	0.5
12	31	0.0
1	31	24.8
2	28	0.0
3	31	21.7
4	30	80.6
5	31	51.8
6	6	2.3

1.2 试验方案与实施

试验采用裂区设计,以灌水量为主处理,氮肥
用量为副处理,共 10 个处理,重复 3 次。灌水量设
置 90 mm 和 150 mm。减氮模式设 3 种:(1)树脂包

膜尿素处理(PCU),按基施树脂包膜尿素(产自山东金正大生态工程股份有限公司,含N为43%,释放期60 d):拔节期追施普通尿素=6:4施入;(2)普通尿素+硝化抑制剂处理(DMPP),氮肥和硝化抑制剂(按施氮量的2%)混合均匀后一次性基施;(3)控释复合肥处理(SF),氮、磷、钾含量分别为23-15-8的控释复合肥(产自安徽六国化工股份有限公司)一次性基施。另设习惯施氮肥(CO)和不施氮肥处理(N0)为对照,习惯施氮处理用普通尿素,按基施:冬灌追施:拔节追施=6:2:2分3次施入。其中,习惯施氮肥的施氮量为 $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,减量施用各处理的施氮量均为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。磷、钾肥全部基施,各处理用量相同。

供试冬小麦品种为西农979,小麦行距20 cm,播种量 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,副处理试验小区面积为 26.25 m^2 ($3.5\text{ m}\times7.5\text{ m}$),试验区周围布设2 m宽保护带。全生育期灌水2次,其他管理同当地大田。2017年10月29日播种,2018年1月22日冬灌,2018年3月27日灌拔节水,6月6日人工收割。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量与干物质量 冬小麦成熟期各小区随机收取 1 m^2 长势均匀的小麦,晾晒后称重,记录干物质量,人工脱粒测产。

1.3.2 作物耗水量及水分利用效率 分别于小麦播前和收获期分层采集0~200 cm土样(20 cm为一层),采用烘干法测定土壤含水率。采用水量平衡法计算作物耗水量(ET)。

计算公式为:

$$ET = Pr + I + U - R - D - \Delta W \tag{1}$$

式中, Pr 为有效降雨量(mm); I 为灌溉量(mm); R 为径流量(mm); D 为深层渗漏量(mm); ΔW 为试验初期和末期0~200 cm土层水分变化量(mm)。 R 、 D 可以忽略不计,地下水位在50 m以下,故 U 也可以忽略不计,上式可以简化为

$$ET = P_r + I - \Delta W \tag{2}$$

作物水分利用效率(WUE, $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)计算公式为:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{3}$$

式中, Y 为作物产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3.3 土壤硝态氮含量的测定 于冬小麦成熟期分层取0~200 cm土层土样(20 cm为一层),混合均匀,自然风干,研磨后过1 mm筛,称取5 g土,采用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提,采用流动分析仪测定土壤中硝态氮(NO_3^--N)含量。

1.4 数据处理与统计分析

土壤硝态氮累积量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)= 土层厚度 $\times$ 土壤容重 $\times$ 土壤硝态氮含量

氮肥农学利用率(AE, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)= (施氮区籽粒产量-对照籽粒产量)/施氮量

氮肥偏生产力(PFP, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)= 施氮区产量/施氮量

利用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,利用 DPS 7.05 软件进行显著性分析, Sigma Plot 12.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 灌水量及减氮模式对冬小麦产量及其构成因素的影响

由表2可知,灌水量对冬小麦有效穗数有极显著性影响,对千粒重和籽粒产量影响显著;减氮模式对冬小麦有效穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量和干物质均有极显著性影响。两者的交互作用对千粒重和籽粒产量有极显著影响,对有效穗数有显著性影响,对其他产量性状无显著性影响。

表2表明,90 mm和150 mm两个灌水量下,各施氮处理冬小麦产量及其构成要素均较不施氮处理(N0)增大,其中以普通尿素+硝化抑制剂处理(DMPP150)增幅最大。与习惯施氮肥处理(CO210)和N0相比,DMPP150处理冬小麦产量及其构成因素均显著提高;灌水量90 mm时,其籽粒产量较CO210和N0处理分别增加17.4%和45.8%,灌水量150 mm时增加20.2%和26.3%。树脂包膜尿素处理(PCU150)较CO210处理有效穗数、籽粒产量和干物质有所增加但不显著;在灌水量90 mm和150 mm时,与N0处理相比其籽粒产量分别增产40.6%和11.6%。当施氮量一致即 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,灌水90 mm的DMPP150处理较PCU150处理冬小麦产量性状有所提高,但不显著;灌水150 mm时,DMPP150处理较PCU150处理千粒重和籽粒产量显著增加。与控释复合肥(SF150)相比,在灌水90 mm和150 mm时DMPP150处理有效穗数、穗粒数、籽粒产量和干物质均显著增加,籽粒产量分别增产33.2%和24.0%;PCU150处理籽粒产量显著高于SF150处理,灌水90 mm和150 mm下分别增产28.4%和9.5%,其他产量性状差异不显著。

灌水量90 mm时,CO210、PCU150处理和DMPP150处理冬小麦有效穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量及干物质均大于灌水150 mm,且籽粒产量分别增产7.4%、14.4%和4.8%。SF150处理在灌水

150 mm 时冬小麦千粒重比灌水 90 mm 显著增加,其他产量性状略有增加。N0 处理在灌水 150 mm 时冬小麦产量及其构成因素比灌水 90 mm 有所增加,其中仅籽粒产量增长显著,增产 10.1%。综上,可以得出冬小麦产量及其构成因素与灌水量和施氮模式均有关。

表 2 不同处理对冬小麦产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of different treatments on winter wheat yield and its constituent factors

灌水量/mm Irrigation amount	减氮模式 N fertilizer-reduction pattern	有效穗数 Available ear /(No·m ⁻²)	穗粒数/个 Grain per ear	千粒重 1 000-grain weight /g	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm ⁻²)	干物质量 Biomass /(kg·hm ⁻²)
90	CO210	444cd	34.6bc	34.8ab	5935b	12936bc
	PCU150	513ab	35.0abc	34.7ab	6715a	14055ab
	SF150	397def	30.2de	31.1d	5230c	11499cd
	DMPP150	539a	38.3a	35.5a	6967a	14587a
	N0	347f	29.3e	30.7d	4777d	11009d
150	CO210	413de	33.1cd	31.5cd	5527bc	12103cd
	PCU150	423cd	32cde	31.9cd	5868b	12737bc
	SF150	406de	31.8cde	33.2bc	5358c	11696cd
	DMPP150	475bc	36.7ab	34.7ab	6646a	13949ab
	N0	364ef	30.1de	31.3cd	5260c	11460cd
显著性检验(<i>F</i> 值) Significant level (<i>F</i> value)						
灌水量 Irrigation		8.35 **	1.25	4.80 *	4.96 *	2.15
减氮模式 N fertilizer reduction pattern		22.70 **	15.51 **	12.93 **	56.64 **	14.79 **
灌水量×减氮模式 Irrigation×N fertilizer reduction pattern		3.54 *	1.52	7.24 **	7.01 **	1.27

注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$);*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$)。下同。
Note:Different letters indicate significant difference ($P<0.05$) among treatments; *: $P<0.05$, **: $P<0.01$.The same below.

2.2 灌水量及减氮模式对冬小麦水分利用效率的影响

方差分析得出,灌水量和减氮模式及其交互作用对冬小麦水分利用效率均有极显著性影响。图 1 表明,灌水量 90 mm 时,各施氮处理冬小麦水分利用效率(WUE)均较不施氮显著增大,其中 DMPP150 处理增幅最大;灌水 150 mm 时,PCU150 和 DMPP150 处理冬小麦 WUE 较不施氮处理显著增大,CO210 和 SF150 处理冬小麦 WUE 与不施氮处理相近。与 CO210 处理和 N0 处理相比,DMPP150 处理 WUE 显著提高,灌水量 90 mm 时,WUE 较 CO210 和 N0 处理分别增加 17.5%和 45.6%,灌水量 150 mm 时增加20.0%和 25.9%。与 CO210 处理相比,PCU150 处理在灌水 90 mm 时冬小麦 WUE 增加 13.5%,灌水 150 mm 时二者相近;与 N0 处理相比,在灌水量 90 mm 和 150 mm 时,其 WUE 分别提高 40.6%和 11.1%。当二者施氮量一致即 150 kg·hm⁻²时,DMPP150 处理与 PCU150 处理冬小麦 WUE 相近,二者均显著高于 SF150 处理,灌水 90 mm 时二者 WUE 分别增加33.0%和 28.4%,灌水 150 mm 时分别增加 23.6%和 9.1%。可见,减氮模式对冬小麦水分利用效率的影响与灌水量有关。

灌水 90 mm 时,各处理冬小麦水分利用效率均

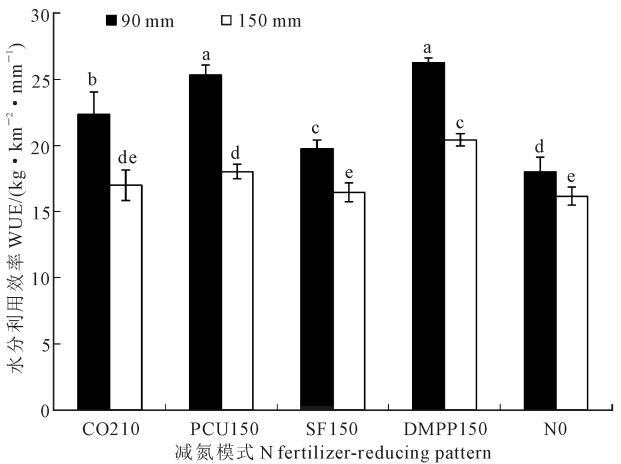


图 1 不同灌水量及减氮模式下冬小麦水分利用效率
Fig.1 Winter wheat water use efficiency under different irrigation and nitrogen fertilizer-reduction pattern

显著高于灌水 150 mm。其中 PCU150 处理冬小麦 WUE 增长最多,增长率达 40.6%;习惯施氮 CO210 处理次之,增长 31.2%;不施氮处理增长最少,增长 11.1%。说明关中平原冬小麦灌水量从 90 mm 增加到 150 mm 使作物水分利用效率下降。

2.3 灌水量及减氮模式对冬小麦氮肥利用效率的影响

由表 3 可知,灌水定额和减氮模式二因素对氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力均有极显著性影

响,两者的交互作用对氮肥偏生产力影响极显著,对氮肥农学利用效率影响不显著。

DMPP150 处理冬小麦氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力均高于其他施氮处理,且在灌水 150 mm 时显著增高,在灌水 90 mm 时,DMPP150 处理氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力与 PCU150 处理差异不显著。与 CO210 处理相比,灌水 90 mm 时 DMPP150 处理和 PCU150 处理氮肥偏生产力分别增加 64.3% 和 58.4%;灌水 150 mm 时,分别增加 68.3% 和 48.6%。SF150 处理氮肥农学利用效率略低于 CO210 处理,氮肥偏生产力在灌水 90 mm 和 150 mm 时比 CO210 处理分别增加 23.4% 和 35.7%。

灌水 90 mm 时,各处理冬小麦氮肥农学利用效率均高于灌水 150 mm。灌水量为 90 mm 时,CO210 处理、PCU150 处理和 DMPP150 处理氮肥偏生产力均大于灌水 150 mm 处理,分别增加 7.4%、14.4% 和 4.8%。SF150 处理灌水 150 mm 时冬小麦氮肥偏生产力比灌水 90 mm 时略增加。

2.4 灌水量及减氮模式对土壤硝态氮空间分布及残留量的影响

2.4.1 灌水量及减氮模式对冬小麦成熟期土壤硝态氮空间分布的影响 由图 2 可知,在两个灌水量下,0~200 cm 各土层 N0 处理土壤硝态氮含量最低,CO210 处理最高。0~40 cm 土层土壤硝态氮含量随着土层深度的增加逐渐降低。40~120 cm 土层内灌水 90 mm 时,随着深度的增加土壤硝态氮含量变化不大;灌水 150mm 时,随着土层深度的增加硝态氮含量逐渐降低。120~200 cm 土层,土壤硝态氮含量随着土层深度的增加逐渐增加,其中灌水 150 mm 的处理硝态氮含量增幅较大。

冬小麦灌水 90 mm 时,0~40 cm 土层内减氮模式 PCU150 处理土壤硝态氮含量高于 SF150 处理和 DMPP150 处理;40~120 cm 土层内各减氮模式土壤硝态氮含量差异不大;120~200 cm 土层内 SF150 处理硝态氮含量略高于 DMPP150 处理和 PCU150 处理。灌水 150 mm 时,0~120 cm 土层内 PCU150 处理硝态氮含量高于 DMPP150 和 SF150 处理。140~200 cm 土层内 SF150 处理硝态氮含量明显较高,PCU150 处理次之,DMPP150 处理含量最低。从图 2 可以看出,在灌水 90 mm 和 150 mm 时,0~40 cm 土层,CO210 处理硝态氮含量与三种减氮模式差异不明显,40~200 cm 土层内 CO210 处理土壤硝态氮含量明显高于各减氮模式。

表 3 不同灌水量及减氮模式下冬小麦氮肥利用效率
Table 3 Nitrogen utilization efficiency of winter wheat under different irrigation and nitrogen fertilizer-reduction pattern

灌水量 Irrigation amount/mm	减氮模式 N fertilizer- reduction pattern	氮肥农学利用效率 Agronomic efficiency of N /(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 N partial factor productivity /(kg·kg ⁻¹)
90	CO210	5.51c	28.26d
	PCU150	12.92a	44.76a
	SF150	3.02cd	34.87c
	DMPP150	14.59a	46.44a
150	CO210	1.27d	26.32d
	PCU150	4.05cd	39.11b
	SF150	0.66d	35.72c
	DMPP150	9.24b	44.31a
显著性检验 (<i>F</i> 值) Significant level (<i>F</i> value)			
灌水量 Irrigation		39.94 **	15.47 **
减氮模式 N fertilizer reduction pattern		31.72 **	200.25 **
灌水量×减氮模式 Irrigation×N fertilizer reduction pattern		2.74	5.59 **

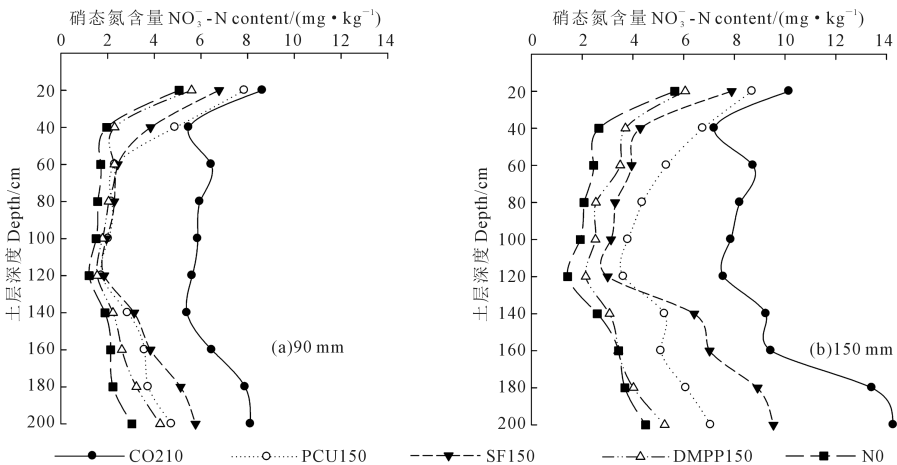


图 2 不同灌水量及减氮模式下冬小麦成熟期 0~200 cm 土层硝态氮含量的分布
Fig.2 NO₃-N distribution in 0~200 cm soil layer at the mature stage of winter wheat under different irrigation and nitrogen fertilizer-reduction pattern

2.4.2 灌水量及减氮模式对冬小麦成熟期土壤硝态氮残留量的影响 方差分析得出,灌水量和减氮模式及其交互作用对冬小麦成熟期 0~200 cm 土层土壤硝态氮残留量均有极显著影响。由图 3 可知,灌水 90 mm 和 150 mm 时,各施氮处理冬小麦成熟期 0~200 cm 土层土壤硝态氮残留量均显著高于不施氮处理,其中 CO210 处理最大。在灌水 90 mm 和 150 mm 时,DMPP150 处理较 CO210 处理分别减少 57.8% 和 62.4%,PCU150 处理分别减少 45.6% 和 41.8%,SF150 处理分别减少 43.9% 和 40.2%。当施氮量为 150 kg · hm⁻²时,SF150 处理土壤硝态氮残留量最大,PCU150 处理与之相近;DMPP150 处理硝态氮残留量最小,较 SF150 处理在灌水 90 mm 和 150 mm 时分别减小 24.8% 和 37.1%。灌水 150 mm 时,各处理冬小麦 0~200 cm 土层土壤硝态氮残留量明显高于灌水 90 mm,以 PCU150 处理增幅最大,SF150 处理次之,分别增大 36.2% 和 35.9%,DMPP150 处理最小,为 23.3%,这说明土壤硝态氮残留对灌水的响应与施氮模式有关。

3 讨 论

本研究表明,增大灌水量导致氮肥利用效率下降。灌水 W1 (90 mm) 时,减氮模式 PCU150 和 DMPP150 处理氮肥偏生产力和农学利用效率均高于灌水 W2 (150 mm),这与灌水量增大导致产量降低及氮素淋失有关。本试验中,与灌水 W2 相比,PCU150 和 DMPP150 处理灌水 W1 时籽粒产量分别

增产 14.4% 和 4.8%。这可能由于冬小麦生长后期自然降雨量大,导致灌水 150 mm 处理作物产量下降。刘小飞等^[21]研究得出过量补充灌水会降低冬小麦产量,适度水分亏缺可增加营养器官花前贮藏物质向籽粒转运。另一方面,本试验中,与灌水量 90 mm 相比,灌水量为 150 mm 时冬小麦成熟期 0~200 cm 土层土壤硝态氮残留量明显增大,尤其是深层土壤 (120~200 cm) 硝态氮含量及残留量显著增大,过量灌水会增加硝态氮向土壤深层迁移,超出作物主要根系分布层,最终使氮肥利用效率降低^[22]。

本研究发现,硝化抑制剂和树脂包膜尿素两种减氮模式能够增加或维持冬小麦产量。这可能与这两种减氮模式下养分供应与作物吸收需求吻合较好有关。本研究中,冬小麦播种期基施尿素加硝化抑制剂这一减氮模式冬小麦产量及其构成因素均高于其他处理,较习惯施氮和不施氮处理分别增产 18.8% 和 35.6%。Pasda 等^[23]研究也表明氮肥中添加 DMPP 可使冬小麦增产 0.24 t · hm⁻²。这可能由于硝化抑制剂 DMPP 能有效地抑制铵态氮转化为硝态氮,尿素中添加 DMPP 可使养分有效期长达 180 d^[24],满足冬小麦全生育期养分需求。本研究还表明,树脂包膜尿素质施 60% + 尿素拔节期追施 40% 这一减氮模式,冬小麦产量与构成因素较习惯施氮 CO210 差异不大,但较不施氮处理产量显著增加,增产 25.4%,可达到减肥增效的作用。这与前人研究结果^[25-27]类似,孙云保^[26]等连续 4 年小麦-玉米轮作试验表明减氮 30% 施用控释氮肥较常量尿素

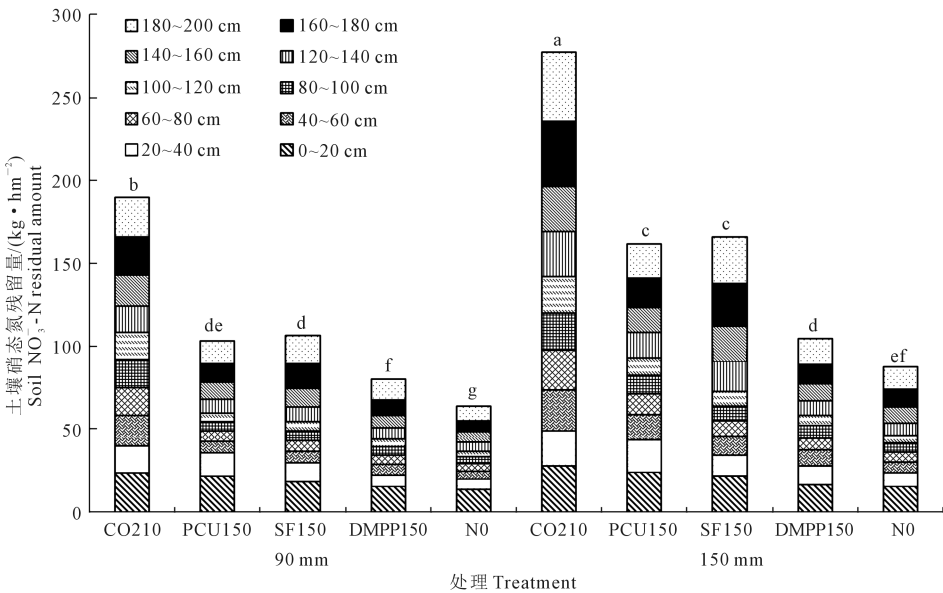


图 3 不同灌水量及减氮模式下冬小麦成熟期 0~200 cm 土层硝态氮残留量

Fig.3 Nitrate N residues in soil layer 0~200 cm at the mature stage of winter wheat under different irrigation and nitrogen fertilizer-reduction pattern

相比,冬小麦籽粒产量均未出现显著下降情况。原因可能在于普通尿素养分释放速度较快,无法满足作物全生育期的养分需求,尤其是冬小麦这类生育期长且需较多氮素的作物,控释氮肥通过改变内核粒子与外界环境中的扩散通量来调控氮素释放速度,而且该模式在拔节期追施了一定量氮肥,可协调养分供应与作物吸收之间的矛盾,减少氮素损失,从而提高作物产量及氮肥利用效率^[28-29]。

本研究发现,硝化抑制剂和树脂包膜尿素两种减氮模式能够增加冬小麦氮肥利用效率。原因可能在于,一方面,这两种模式可维持或增加作物产量;另一方面,氮肥的气态损失随着施氮量的增加而增加^[30-31],而且,随着施氮量增加土壤硝态氮含量也随之增加,且向下淋失的趋势明显^[29, 32],导致可供作物吸收利用的有效氮量减少。本研究中,冬小麦成熟期 0~40 cm 土层各处理硝态氮含量差异不大,40~200 cm 土层习惯施氮处理土壤硝态氮含量明显高于减氮模式 PCU150 和 DMPP150 处理,进一步证明了这一点。

4 结 论

1) 灌水量和减氮模式两因素对冬小麦有效穗数、千粒重、籽粒产量、土壤硝态氮残留量及水分和氮肥利用效率均有显著影响,二者间也存在明显的交互作用。

2) 与习惯施氮和不施氮相比,减氮模式普通尿素+硝化抑制剂冬小麦产量及水氮利用效率明显增加。与 CO210 处理相比,DMPP150 处理在灌水 90 mm 和 150 mm 时,产量分别增加 17.4% 和 20.2%,水分利用效率提高 17.5% 和 20.0%,土壤硝态氮残留量减少 57.8% 和 62.4%,氮肥利用效率提高 64.3% 和 68.4%。

3) 减氮模式树脂包膜尿素处理冬小麦产量及水氮利用效率较习惯施氮处理略有增加,灌水 90 mm 和 150 mm 时较 CO210 处理土壤硝态氮残留量减少 45.6% 和 41.8%,氮肥利用效率提高 58.4% 和 48.6%。

4) 综合考虑产量、水氮利用效率和土壤硝态氮残留量,试验区冬小麦可采用 150 kg·hm⁻² 施氮量,播种时一次性施用尿素加硝化抑制剂或者以树脂包膜尿素质施 60%+拔节期追施普通尿素 40% 这两种减氮模式,在苗期和拔节期灌水两次,灌水量共 90 mm,使产量提高或维持稳定,土壤硝态氮残留减少,水氮利用效率提高。

参 考 文 献:

[1] 张保军,张正茂,李思训,等.提升陕西省小麦生产能力的区域分析[J].麦类作物学报,2009,29(4):701-705.

[2] Frink C R, Waggoner P E, Ausubel J H. Nitrogen fertilizer: retrospect and prospect[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,1999,96(4):1175-1180.

[3] 赵护兵,王朝辉,高亚军,等.陕西省农户小麦施肥调研评价[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):245-253.

[4] 同延安,OveEmteryd,张树兰,等.陕西省氮肥过量施用现状评价[J].中国农业科学,2004,37(8):1239-1244.

[5] 赵护兵,王朝辉,高亚军,等.西北典型区域旱地冬小麦农户施肥调查分析[J].植物营养与肥料学报,2013,19(4):840-848.

[6] 常艳丽,刘俊梅,李玉会,等.陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(8):51-61.

[7] 薛高峰,张贵龙,孙焱鑫,等.包膜控释尿素(追施)对冬小麦生长发育及土壤硝态氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(2):377-384.

[8] 闫湘,金继运,何萍,等.提高肥料利用率技术研究进展[J].中国农业科学,2008,41(2):450-459.

[9] 翟军海,高亚军,周建斌.控释/缓释肥料研究概述[J].干旱地区农业研究,2002,20(1):45-48.

[10] 谷佳林,徐秋明,曹兵,等.缓控释肥料的研究现状与展望[J].安徽农业科学,2007,39(32):10369-10372.

[11] 林清火,刘海林,黄艳艳,等.4 种缓控释氮肥的养分释放特征及肥效[J].热带作物学报,2018,39(9):1718-1723.

[12] 张德奇,季书勤,王汉芳,等.缓/控释肥的研究应用现状及展望[J].耕作与栽培,2010,(3):46-48,43.

[13] 王亮,秦玉波,于阁杰,等.新型缓控释肥的研究现状及展望[J].吉林农业科学,2008,33(4):38-42.

[14] 于立芝,李东坡,俞守能,等.缓/控释肥料研究进展[J].生态学杂志,2006,25(12):1559-1563.

[15] 孔东,晏云,段艳,等.不同水氮处理对冬小麦生长及产量影响的田间试验[J].农业工程学报,2008,24(12):36-40.

[16] 程宪国,汪德水,张美荣,等.不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J].中国农业科学,1996,29(4):68-75.

[17] 张忠学,于贵瑞.不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2003,22(2):1-4.

[18] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China - Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3):117-127.

[19] Wallance A. Interactions of two parameters in crop production and in general biology: Sequential additivity, synergism, antagonism[J]. Journal of Plant Nutrition,1990,13(3/4):327-342.

[20] 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.

[21] 刘小飞,费良军,孟兆江,等.水分养分协同对冬小麦干物质运转和氮吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):905-914.

[22] 廖上强,陈延华,李艳梅,等.减量灌溉条件下缓释肥料对番茄产量、品质及硝态氮淋溶的影响[J].中国土壤与肥料,2015(6):70-75.