文章编号:1000-7601(2024)01-0123-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2024.01.12

灌溉量和氮肥增效剂对夏玉米产量及水肥利用的影响

张 俊[1],王小昌[2],崔晓路[1],李澳旗[1],赵 璐[1],胡田田[1]

(1.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;
2.陕西省农业宣传信息中心 陕西 西安 710048)

摘 要:为探究水分和氮肥增效剂对夏玉米生长及水肥利用的综合影响,通过设置 40 mm(W1)和 60 mm(W2)两个灌水水平下不施氮肥(N0)、施用氮肥(U)、氮肥+硝化抑制剂(U+DCD)、氮肥+脲酶抑制剂(U+NBPT)、氮肥+双效抑制剂(U+N+D)5 种氮肥施用措施,开展夏玉米田间试验。结果表明:相较于施用氮肥处理,氮肥配施增效剂可以显著提高夏玉米产量、成熟期地上生物量、净收益、水分利用效率和氮肥偏生产力,增幅分别为 5.92%~13.82%、5.85%~18.07%、11.12%~24.30%、12.35%~41.83%和 5.93%~13.80%,其中氮肥配施双效抑制剂效果较优;氮肥配施脲酶抑制剂和双效抑制剂可以降低夏玉米农田土壤氨挥发累积量和成熟期土壤硝态氮残留量,前者效果最优。相比于 W1,W2 水平下氮肥配施双效抑制剂处理玉米产量、成熟期地上生物量、净收益、水分利用效率和氮肥偏生产力分别提高 10.54%、15.51%、19.40%、20.31%和 27.36%;氮肥配施脲酶抑制剂处理农田土壤氨挥发累积量和硝态氮残留量分别降低 11.33%和 48.46%。综合考虑夏玉米施肥灌水方案的经济效益、环境效益、水肥利用效率和玉米植株生长,构建模糊综合评价体系,得到最优处理为灌水量 60 mm 下氮肥配施双效抑制剂。

关键词:灌溉量;氮肥增效剂;土壤氨挥发;土壤硝态氮残留;夏玉米产量;水肥利用

中图分类号:S275;S143.1+6 **文献标志码**:A

Effects of irrigation amount and nitrogen synergists on yield and utilization of water and fertilizer of summer maize

ZHANG Jun[1], WANG Xiaochang[2], CUI Xiaolu[1], LI Aoqi[1], ZHAO Lu[1], HU Tiantian[1]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Regions of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Shaanxi Agricultural Publicity and Information Center, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: To explore the comprehensive effects of water and nitrogen synergists on the growth and utilization of water and fertilizer of summer maize, summer maize field experiments were carried out under two irrigation levels of 40 mm (W1) and 60 mm (W2). Five nitrogen applications including no nitrogen (N0), urea (U), urea + nitrification inhibitor (U+DCD), urea + urease inhibitor (U+NBPT), urea + double-effect inhibitor (U+N+D) were implemented. The results showed that urea combined with urea synergist significantly increased summer maize yield, aboveground biomass at maturity, net income, water use efficiency and partial productivity of nitrogen fertilizer compared with urea alone. The increases were 5.92%~13.82%, 5.85%~18.07%, 11.12%~24.30%, 12.35%~41.83% and 5.93%~13.80%, respectively, and urea combined with double-effect inhibitor had the best effect. The application of urease inhibitor and double-effect inhibitor also reduced the accumulation of ammonia volatilization and the residual amount of nitrate nitrogen in mature soil of summer maize field, among which urea combined with urease inhibitor had the best effect. Compared with W1, urea combined with double-effect inhibitor treatment at W2 level improved the yield, aboveground biomass, net income, water use efficiency, and partial productivity of

收稿日期:2023-05-12 **修回日期**:2023-10-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1900401)

作者简介:张俊(1997-),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为农业节水理论与技术。E-mail:2020055859@nwafu.edu.cn

通信作者:胡田田(1965-),女,陕西礼泉人,教授,主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail:hutiant@nwsuaf.edu.cn

nitrogen ferilizer at maturity by 10.54%, 15.51%, 19.40%, 20.31%and 27.36%, respectively. The treatment of urea combined with urease inhibitor decreased the accumulation of ammonia volatilization and residual amount of nitrate nitrogen in summer maize field soil by 11.33% and 48.46%, respectively. Considering the economic benefits, environmental benefits, water and fertilizer utilization efficiency, and plant growth of the summer maize fertilization and irrigation scheme, a fuzzy comprehensive evaluation system was established, and the optimal treatment was urea combined with double-effect inhibitor under 60 mm irrigation.

Keywords: irrigation amount; nitrogenous synergist; soil ammonia volatilization; soil nitrate nitrogen residue; summer maize yield; utilization of water and fertilizer

目前我国的氮肥施用量居世界首位,但氮肥利用率仅为 28%~41%,平均 33.7%,远低于发达国家的水平[1]。残留在土壤中的氮肥随着降雨等途径深层淋溶,还会造成地下水污染、土壤酸化等环境污染问题,保护环境迫在眉睫。中国的人均耕地面积少,为保证粮食安全,提高粮食产量势在必行。因此在保障粮食产量的前提下,提高氮肥的利用效率便成为了解决问题的关键。

相关研究表明,氮肥配施氮肥增效剂可以在保证作物产量的前提下,提升氮素利用效率,降低氮肥的施用量[2]。氮肥单独配施硝化抑制剂或脲酶抑制剂可以提高作物产量、地上生物量和氮肥利用效率,降低土壤 N_2O 损失量和土壤硝态氮残留量,但施用硝化抑制剂可能会增加氨挥发损失[3-6]。双效抑制剂是脲酶抑制剂和硝化抑制剂的组合,不仅可以延缓尿素的水解速率,还能一定程度上延缓尿素水解后的硝化过程,兼顾增产提效减排[7]。然而,氮肥增效剂的施用效果会受灌水量等因素的影响,Allende 等[8]研究发现在施用脲酶抑制剂的处理下增加灌水量对产量无显著影响,施用脲酶抑制剂或施肥后灌溉(或降雨)均会减少 NH_3 的损失,但施用脲酶抑制剂同时灌水不会进一步减少氨挥发损失。但也有研究发现在高降雨的土壤水分状况下施用脲酶抑制剂,降低土壤氨挥发损失的效果更好[9]。高珊等[10]发现,在不同土壤含水量条件下硝化抑制剂对 N_2O 排放和 NH_3 挥发气态损失的影响差异显著。

目前灌水对氮肥增效剂施用效果的影响尚不明确,且大多研究仅关注氮素损失、作物生长和水肥利用等单一方面,关于不同灌水量和氮肥增效剂类型施用效果的综合性报道相对较少,且氮肥增效剂在关中地区夏玉米种植上应用效果的研究也较为缺乏。基于此,本研究通过田间试验确定灌水量和氮肥增效剂类型对玉米生长、产量、经济效益、氨挥发损失、土壤硝态氮残留、水分利用效率和肥料利用效率的影响,同时基于多层次模糊综合评价模型,建立基于关中夏玉米生长发育、经济效益、水肥利用效率和环境效益的评价体系,确定适合关中地区的灌溉量和氮肥增效剂类型,以期为关中地区夏玉米生产中氮肥增效剂的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年在西北农林科技大学节水灌溉试验站(108°24′E,34°20′N)进行,该地区海拔 521 m,属于暖温带季风半湿润气候区,年平均温度为 12.9℃,多年平均降水量 635 mm(主要集中在 7、8、9 月),年平均蒸发量 1 500 mm。试验区土壤质地为重壤土,0~100 cm 土层的土壤田间持水量(WHC)为 23%~25%(质量含水量,下同),凋萎系数为 8.5%,0~20 cm 土层的土壤 pH 值为 8.14,有机质含量为 12.02 g·kg^{-1},全氮含量为 0.89 g·kg^{-1},速效磷含量为 8.18 mg·kg^{-1},碱解氮含量为 55.3 mg·kg^{-1}。试验期间气象资料如图 1 所示。

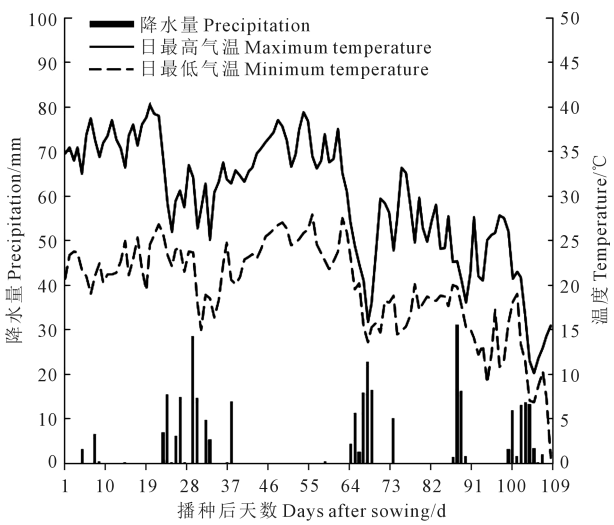


图 1 试验区夏玉米季日最高、最低气温与降水的分布

Fig.1 Distribution of daily maximum, minimum temperature, and precipitation in the test area during summer maize growing season

1.2　试验设计

试验采用裂区设计,以灌水量和氮肥增效剂类型为试验因素,灌水量为主区,氮肥增效剂类型为副区。考虑当季降水量条件下的充分、非充分灌溉条件,灌水量设 2 个灌溉定额,分别为 40 mm(W1)和 60 mm(W2),均分两次在播种后和拔节期灌溉,单次灌溉量分别为 20 mm 和 30 mm;副区设 1 个单施化肥(U)处理和 3 个化肥配施不同类型氮肥增效剂处理,分别为配施脲酶抑制剂(NBPT,正丁基硫代磷酰三胺 N -(n-butyl) thiophosphoric triamide;U+NBPT)、硝化抑制剂(DCD,双氰胺 Dicyandiamide;U+DCD)和双效抑制剂(NBPT+DCD;U+N+D);两个灌水量下各设一个不施氮肥的处理(N0)。共 10 个处理,3 次重复,30 个小区,小区面积为 19.8 m^2。具体验方案见表 1。3 种氮肥增效剂由索尔维中国公司生产提供,均按推荐使用量使用。

表 1　试验方案

Table 1　Test scheme

处理 Treatment	灌溉定额 Irrigation quota/mm	尿素用量 Urea amount /(kg · hm^{-2})	氮肥增效剂类型 Nitrogen fertilizer synergist type	氮肥增效剂用量 Synergist amount /(kg · hm^{-2})
N0		0.00		0.00
U		391.30		0.00
U+DCD	40(W1)	391.30	DCD	2.29
U+NBPT		391.30	NBPT	1.17
U+N+D		391.30	NBPT+DCD	2.29
N0		0.00		0.00
U		391.30		0.00
U+DCD	60(W2)	391.30	DCD	2.29
U+NBPT		391.30	NBPT	1.17
U+N+D		391.30	NBPT+DCD	2.29

供试夏玉米品种为'郑单 958',于 2022 年 6 月 17 日播种,种植行距 60.0 cm,株距 23.5 cm,播种密度 70 922 株 · hm^{-2},10 月 10 日收获。供试氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)和氯化钾(含 K_2O 62%),施用量分别为 180 kg · hm^{-2}(折纯,关中地区高产推荐施氮量[11])、90 kg · hm^{-2}和 60 kg · hm^{-2}(折纯),所有肥料及氮肥增效剂均一次性基施。其他田间管理措施同当地正常水平。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　土壤含水率　于夏玉米播前和收获后,采用烘干法测定各处理 0~180 cm 土层的土壤含水率(以 20 cm 为一层分层测定)。

1.3.2　玉米产量　于夏玉米成熟期,各处理随机收获两行玉米穗,自然风干后脱粒称重,同时测定籽粒含水率(含水率为 13%),折算每公顷产量。

1.3.3　地上生物量　于夏玉米成熟期,各处理随机选取 3 株玉米,贴地面采集地上部样品,分器官装袋,置于烘箱内 105℃杀青 30 min 后 75℃干燥至质量恒定,称取干质量,并折算每公顷生物量。

1.3.4　植株全氮含量　将干燥后的植株样品粉碎,过 0.5 mm 筛,浓 H_2SO_4-H_2O_2消煮后,用 AA3 型流动分析仪(Seal,德国)测定玉米植株各器官氮素含量。

1.3.5　土壤氨挥发累积量　土壤氨挥发量采用通气法测定,测定频率为施肥后第 1 周每天取样 1 次,之后 3~7 d 取样 1 次,直至挥发量很低且趋于稳定后停止。取样后将收集的海绵立即装入盛有 300 mL 浓度为 1 mol · L^{-1}氯化钾溶液的塑料瓶内进行振荡提取,浸提液用 AA3 型流动分析仪(Seal,德国)测定溶液中的铵态氮含量 M_i,计算土壤氨挥发累积量。

1.3.6　土壤硝态氮含量　于夏玉米成熟期,各处理取 0~180 cm 土层的土样,每 20 cm 为一层,研磨过筛后用 KCl 溶液浸提,使用流动分析仪测定土壤硝态氮含量。

1.4　数据计算与分析

1.4.1　数据计算

(1)土壤氨挥发累积量[12]计算公式如下:

$$CAE = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{0.01\,M_i}{0.99A}\right) \quad (1)$$

式中,CAE 为氨挥发累积量(kg · hm^{-2});M_i 为单个装置平均每次收集的铵态氮含量(mg);A 为收集装置的横截面积,取 0.0177 m^2;n 为收集次数;0.99 为捕获装置的回收率。

(2)土壤硝态氮残留量。土壤硝态氮残留量(kg · hm^{-2}) = ∑土层厚度(cm)×土壤容重(g · cm^{-3})×土壤硝态氮含量(mg · kg^{-1})/10　(2)

(3)水分利用效率计算公式如下:

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中,WUE 为水分利用效率(kg · m^{-3});Y 为玉米产量(kg · hm^{-2});ET 为玉米耗水量(mm);ET 计算公式如下:

$$ET = P_r + I + U - R - D - \Delta W \quad (4)$$

式中,P_r 为有效降雨量(mm);I 为灌溉量(mm);U 为地下水补给量(mm);R 为径流量(mm);D 为深层渗漏量(mm);ΔW 为试验初期和末期 0~180 cm 土层土壤水分变化量(mm)。其中,R、D 可以忽略不计;因地下水位在 50 m 以下,U 也可忽略不计。

(4)氮素利用指标[13]计算公式如下:

氮肥偏生产力($NPFP$)(kg · kg^{-1}) =

夏玉米产量/施氮量　(5)

氮肥农学利用效率(AUE)(kg · kg^{-1})=(施氮区的籽粒产量-不施氮区的籽粒产量)/施氮量 (6)

氮素利用率(NUE)(%)=(施氮区的植株全氮含量-不施氮区的植株全氮含量)/施氮量 (7)

(5)经济效益计算公式如下:

$$EB = G_P - I_C - F_C - O \quad (8)$$

式中,EB 为净收益(CNY · hm^{-2});G_P 为毛收入(CNY · hm^{-2});I_C 为灌溉费用(CNY · hm^{-2});F_C 为肥料费用(CNY · hm^{-2});O 表示其他费用(CNY · hm^{-2})。

1.4.2 综合评价方法

(1)构建模糊综合评价体系。参考 Xiao 等[14]的研究构建模糊综合评价体系。将灌水水平和氮肥增效剂的综合评价体系分为 3 个层次,从上到下分别为目标层、中间层和指标层,将产量(U_{11})和净收益(U_{12})分类为经济效益指标,将氨挥发累积量(U_{21})和成熟期硝态氮残留量(U_{22})分类为环境效益指标,N_2O 总体排放量较小[15],因此本综合评价体系未选用该指标,将水分利用效率(U_{31})和氮肥偏生产力(U_{32})分类为水肥利用指标,将地上生物量(U_{41})分类为作物生长指标。构建综合评价体系层次结构如图 2 所示。

(2)设定评语集。建立模糊综合评价的标准评语集,设 V={V_1,V_2,V_3,V_4,V_5}为评语集,V_1代表极好,V_2代表好,V_3代表良,V_4代表差,V_5代表极差。

(3)计算组合权重。采用层次分析法获取主观权重 W_j,熵权法计算客观权重 w_j,组合权重 W_{comp} 的计算方法如下[16]:

$$W_{comp} = \frac{\sqrt{W_j w_j}}{\sum_{j=1}^{z} \sqrt{W_j w_j}} \quad (9)$$

(4)模糊综合评价。采用隶属度函数描述夏玉米综合评价中各评价指标的隶属度。产量、经济效益、水分利用效率、氮肥偏生产力和地上生物量等均为正向指标,土壤氨挥发累积量和硝态氮残留量为负向指标。采用梯形隶属函数分布计算各处理相应指标的隶属度矩阵[17],将各指标隶属度矩阵整合为模糊矩阵 R_{ij}。通过以下公式计算得到相应的综合评价结果:

$$C_i = W_{comp} \times R_{ij} \quad (10)$$

式中,C_i 为评价结果;W_{comp} 为组合权重。模糊综合评价的结果是一个向量,为了更直观地比较处理之间的优劣,将评语集 V={V_1,V_2,V_3,V_4,V_5}对应评语进行打分得到相应的分数集:V_k^T={5,4,3,2,1}^{T}。通过如下公式计算得到综合评分 A:

$$A = C_i \times V_K^T \quad (11)$$

1.4.3 数据分析 采用 Excel 2016 进行数据整理,使用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析(ANOVA)和多重比较,多重比较采用最小显著性差异法(LSD),用 Excel 2016 和 Origin 2022b 进行图表绘制。

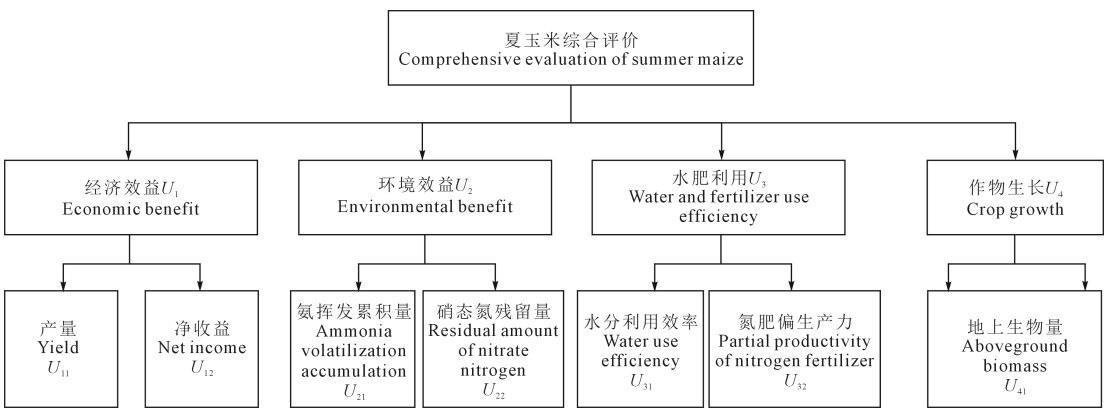


图 2 综合评价体系

Fig.2 Comprehensive evaluation system

2 结果与分析

2.1 不同处理下夏玉米产量和成熟期地上生物量

不同处理的夏玉米产量如图 3A 所示,与 U 处理相比,W1 水平下配施氮肥增效剂处理玉米产量增加 5.92%~13.82%,W2 水平下产量增加 6.38%~13.27%。W1 水平下 U+DCD 处理产量最高且显著高于其他施用氮肥增效剂的处理,W2 水平下 U+N+D 与 U+DCD 处理产量最高。

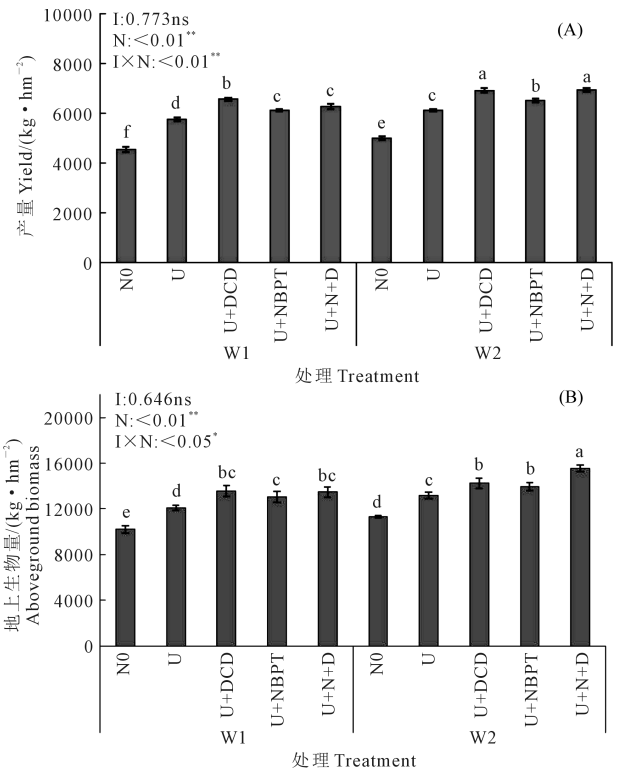
图 3B 表明,同一灌水水平下,玉米地上生物量均表现为施用氮肥增效剂的处理高于未施用氮肥增效剂的处理,W1 水平下地上生物量增幅为8.12%~12.31%,W2 水平下增幅为 5.85%~18.07%。W1 水平下 U+DCD 处理地上生物量最高,但与其他氮肥

增效剂处理差异不显著;W2 水平下 U+N+D 最高,较其他氮肥增效剂处理提高 9.28%~17.24%。

由图 3 可知,W2 较 W1 各处理玉米产量和地上生物量分别增加 5.37%~10.54%和 5.03%~15.51%。以上结果表明,化肥配施氮肥增效剂及适当增大灌水量能提高夏玉米产量和地上生物量。

2.2　不同处理下夏玉米水肥利用效率

灌水水平及氮肥增效剂对夏玉米水肥利用效率的影响如表 1 所示。灌水量与氮肥增效剂类型及两者互作对水分利用效率(*WUE*)有显著影响。与 U 相比,施用氮肥增效剂处理的 *WUE* 在 W1 和 W2 灌水水平下分别提高 25.49%~41.83%和 12.35%~35.88%。灌水量增大会提高 U、U+DCD 和 U+N+D 处理夏玉米水分利用效率,与 W1 灌水水平相比,W2 水平下 3 个处理水分利用效率分别提高 11.11%、9.84%和 20.31%;U+NBPT 处理水分利用效率随灌水量的增加而减小 11.98%,U+N+D 处理随灌水量增加的幅度最大。以上结果表明,施用氮肥增效剂能显著提高夏玉米水分利用效率。



注:图中不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。I 和 N 分别表示灌水水平和增效剂处理,I×N 表示灌水水平和增效剂类型的交互效应;ns、* 和 * * 分别表示差异不显著、显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). I and N represent irrigation level andsynergist treatment, and I×N represents the interaction effect of irrigation level andsynergist treatment. ns, * and * * indicated no significant difference, significant difference ($P<0.05$) and extremely significant difference ($P<0.01$), respectively. The same below.

图 3　灌水水平及氮肥增效剂处理对夏玉米产量及地上生物量的影响

Fig.3　Effects of irrigation level and synergist treatment on yield and aboveground biomass of summer maize

由表 2 可知,氮肥增效剂类型对氮肥偏生产力(*NPFP*)、氮肥农学利用效率(*AUE*)和氮素利用率(*NUE*)均影响显著。相比于 U 处理,施用氮肥增效剂处理的 *NPFP*、*AUE* 和 *NUE* 均显著增大,W1 灌水水平下 U+DCD 处理增加最为显著,增幅分别为 13.80%、79.87%和 67.53%;W2 灌水水平下 U+N+D 处理 *NPFP*、*AUE* 和 *NUE* 增幅分别为 13.27%、59.05%和 4.07%,效果最为显著。与 W1 相比,W2 灌水水平下各处理 *NPFP* 和 *NUE* 分别提高 5.38%~10.51%和 5.85%~29.58%,*AUE* 无显著提升。综上所述,施用氮肥增效剂能显著提高氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率和氮素利用率,增大灌水量能显著提高氮肥偏生产力和氮素利用率。

2.3　不同处理下夏玉米经济效益

不同处理夏玉米经济效益如表 3 所示。由表 3 可知,施用氮肥增效剂可以显著提高玉米种植净收益,与 U 处理相比,W1 灌水水平下施用氮肥增效剂

表 2　灌水水平及氮肥增效剂处理对夏玉米水肥利用的影响

Table 2　Effects of irrigation level and synergist treatment on water and nitrogen utilization of summer maize

灌水水平 Irrigation level	增效剂处理 Synergist treatment	*WUE* /(kg·m⁻³)	*NPFP* /(kg·kg⁻¹)	*AUE* /(kg·kg⁻¹)	*NUE*/%
W1	N0	1.48f	25.29g		
	U	1.53f	32.04e	6.21e	23.28e
	U+DCD	1.93d	36.46b	11.17a	39.00ab
	U+NBPT	2.17b	33.94d	8.64c	34.87cd
	U+N+D	1.92d	34.83c	9.53b	32.45d
W2	N0	1.49f	27.77f		
	U	1.70e	33.98d	6.74d	25.63e
	U+DCD	2.12c	38.42a	10.65a	41.28ab
	U+NBPT	1.91d	36.15b	8.38c	37.94bc
	U+N+D	2.31a	38.49a	10.72a	42.05a
方差分析 Analysis of variance					
I		* *	* *	ns	* *
N		* *	* *	* *	* *
I×N		* *	* *	* *	*

注:同列不同字母表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平;I 和 N 分别为灌水水平和增效剂处理;ns、* 和 * * 分别表示差异不显著、显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate that the difference between treatments reaches the significant level of $P<0.05$. I and N are irrigation level and synergist treatment respectively. ns, * and * * indicated no significant difference, significant difference ($P<0.05$) and extremely significant difference ($P<0.01$), respectively. The same below.

表 3 灌水水平及氮肥增效剂处理对夏玉米经济效益的影响/(CNY · hm^{-2})

Table 3 Effects of irrigation level and synergist treatment on economic benefits of summer maize

处理 Treatment		支出 Output			收入 Income	
灌水水平 Irrigation level	增效剂处理 Synergist treatment	水费 Water bill	肥料 Fertilizer	其它 Other	毛收入 Gross income	净收益 Net income
W1	N0	160	2257	4580	13428d	6431g
	U	160	3979	4580	17013c	8294e
	U+DCD	160	4103	4580	19364ab	10522b
	U+NBPT	160	4063	4580	18019bc	9216d
	U+N+D	160	4128	4580	18494bc	9626c
W2	N0	240	2257	4580	14747d	7670f
	U	240	3979	4580	18045bc	9246d
	U+DCD	240	4103	4580	20411a	11488a
	U+NBPT	240	4063	4580	19199ab	10316b
	U+N+D	240	4128	4580	20441a	11493a

注:肥料支出包括肥料和氮肥增效剂费用,其它支出包括播种、收割、翻地、脱粒及田间管理措施等费用。

Note: Fertilizer expenditure includes the cost of fertilizer and nitrogen fertilizer synergists. Other expenditure includes the cost of sowing, harvesting, turning over and threshing.

的处理毛收入和净收益分别增长 1 006~2 351 CNY · hm^{-2}和 922~2 228 CNY · hm^{-2},净收益增长率为 11.12%~21.17%;W2 灌水水平下毛收入和净收益分别增长 1 154~2 396 CNY · hm^{-2}和 1 070~2 247 CNY · hm^{-2},净收益增长率为 11.57%~24.30%。毛收入和净收益随灌水量的增大而增大。与 W1 相比,W2 灌水水平下各施用氮肥处理的毛收入和净收益分别增长 5.41%~10.53%和 9.18%~19.40%。毛收入随灌水量的增大和氮肥增效剂的施用而增长的同时,肥料和灌水成本也随之增加。

2.4 不同处理下土壤氨挥发

夏玉米播种后土壤氨挥发累积量随时间的变化如图 4 所示,各处理土壤氨挥发累积量动态变化规律总体一致,均表现为第一周上升较快,随后上升变缓,最后逐渐趋于稳定。施肥后第一周氨挥发累积量在氨挥发累积总量中的占比,W1 灌水水平下达 31.39%~61.02%,W2 灌水水平下达 42.07%~70.00%,两灌水水平下均为处理 U 占比最高。施用不同类型氮肥增效剂土壤氨挥发累积量的表现不同。与不施用氮肥增效剂的处理相比,W1 灌水水平下 U+DCD 处理氨挥发累积量增大 17.36%,U+NBPT 和 U+N+D 处理分别减小 18.93%和 7.23%;W2 灌水水平下 U+DCD 处理氨挥发累积量增大 5.98%,U+NBPT 和 U+N+D 处理分别减小 14.29%和 6.25%。随灌水量的增加各处理氨挥发累积量均出现下降,相比于 W1,W2 灌水水平下各处理氨挥发累积量降低 5.90%~19.63%,施用氮肥的处理中 U+NBPT 氨挥发累积量最低,较 W1 降低 11.33%。

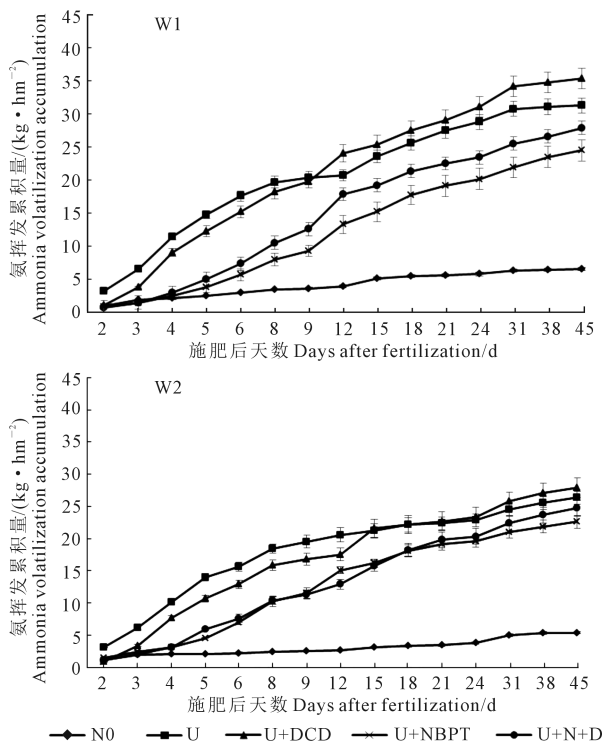


图 4 不同灌水水平下夏玉米生育期农田土壤氨挥发累积量

Fig.4 Ammonia volatilization accumulation in summer maize growing stage under different irrigation levels

2.5 不同处理下土壤硝态氮残留

夏玉米成熟期 0~180 cm 土层土壤硝态氮残留量如图 5 所示。在相同施肥水平下,施用氮肥增效剂处理的土壤硝态氮残留量低于未施用氮肥增效剂处理。与 U 相比,施用氮肥增效剂处理在 W1 灌水水平下硝态氮残留量降低 3.55%~33.58%,W2 灌水水平下降低 1.97%~40.66%。W1 灌水水平下 U+

DCD 处理硝态氮残留量最低,为 152.57 kg · hm^{-2};W2 灌水水平下 U+NBPT 处理硝态氮残留量最低,为 97.18 kg · hm^{-2}。灌水量也对土壤硝态氮残留量影响显著,W2 水平下 0~180 cm 土层土壤硝态氮残留较 W1 减少-0.52%~48.46%;除 DCD 处理外,其余各处理硝态氮残留均随灌水量的增大而减小。在两个灌水水平下,施用氮肥处理 0~60 cm 土层土壤硝态氮残留占 0~180 cm 土层硝态氮残留量比例均为处理 U 最大,分别为 76.19%和 52.42%;施用氮肥增效剂处理 0~60 cm 土层硝态氮残留量占比在 W1 和 W2 灌水水平下分别较 U 处理减少 31.38%~47.39%和 1.51%~26.8%。随灌水量的增大,各处理总体呈 0~60 cm 土层土壤硝态氮残留量占比减小,60~180 cm 土层占比增大的趋势。

2.6　模糊综合评价

2.6.1　主观权重　计算并通过一致性检验可得到各指标主观权重如表 4 所示,各专家一致认为,在玉米生产中作物的经济效益最重要,环境效益和水肥利用重要程度相近,作物生长最不重要。经济效益中,产量和净收益重要程度相近;环境效益中,氨挥发累积量更重要;水肥利用中,水分利用效率和氮肥偏生产力重要程度相近。

2.6.2　客观权重及组合权重　通过熵权法得到各指标客观权重及组合权重如表 5 所示,结果表明水分利用效率客观权重值最大,为 0.228;其次是土壤氨挥发损失和硝态氮残留量,其余指标客观权重值相近。通过分析各指标组合权重值的大小,表明土壤氨挥发累积量在该综合评价体系中最为重要,其他指标重要性表现为净收益>硝态氮残留量>产量>水分利用效率>氮肥偏生产力>成熟期地上生物量。

2.6.3　综合评价　根据公式(11)得到处理综合评价得分如表 6 所示,在综合考虑经济效益、水肥利用、环境效益、作物生长的情况下,总体表现为 W2 水平下综合评分较高,且在 60 mm 灌溉水平下施用双效抑制剂处理的综合效果最好。

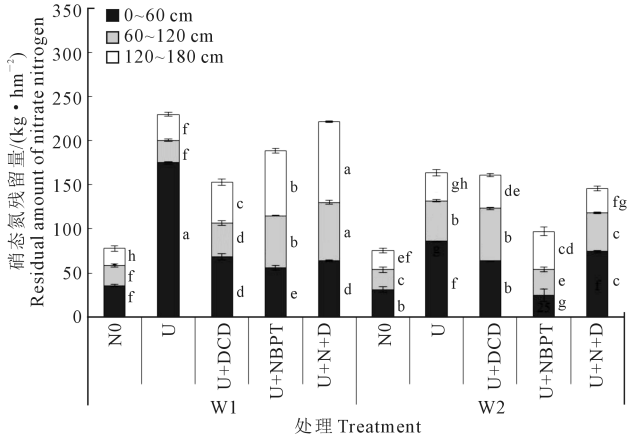


图 5　夏玉米农田土壤硝态氮残留

Fig.5　Residual nitrate nitrogen in summer maize field soil

表 4　主观权重综合评价

Table 4　Comprehensive evaluation of subjective weight

目标 Objective	因素 Factor	因素权重 Factor weight	指标 Index	指标权重 Index weight	总体权重 Population weight
灌水及氮肥增效剂类型施用效果综合评价 Comprehensive evaluation of application effect of irrigation and nitrogen fertilizer synergist type	经济效益 Economic benefit	0.500	U_{11}	0.500	0.250
			U_{12}	0.500	0.250
	环境效益 Environmental benefit	0.214	U_{21}	0.550	0.118
			U_{22}	0.450	0.096
	水肥利用 Utilization of water and fertilizer	0.214	U_{31}	0.500	0.107
			U_{32}	0.500	0.107
	作物生长 Crop growth	0.072	U_{41}	1.000	0.072

表 5　客观权重及组合权重综合评价

Table 5　Comprehensive evaluation of objective weight and combined weight

指标 Index	U_{11}	U_{12}	U_{21}	U_{22}	U_{31}	U_{32}	U_{41}
客观权重 Objective weight	0.108	0.113	0.184	0.151	0.228	0.108	0.108
组合权重 Combined weight	0.160	0.166	0.170	0.164	0.132	0.115	0.093

表 6　综合评价结果

Table 6　Comprehensive evaluation results

灌水水平 Irrigation level	增效剂处理 Synergist treatment	综合评价得分 Score	排名 Rank
W1	N0	2.32	9
	U	2.06	10
	U+DCD	3.58	4
	U+NBT	3.30	5
	U+N+D	2.97	6
W2	N0	2.61	8
	U	2.96	7
	U+DCD	3.68	3
	U+NBPT	3.99	2
	U+N+D	4.43	1

3 讨 论

3.1 水分和氮肥增效剂对夏玉米产量、地上生物量及经济效益的影响

灌水水平和氮肥增效剂类型对夏玉米产量及成熟期地上生物量影响显著。相关研究发现添加硝化抑制剂或脲酶抑制剂可显著增加玉米产量和地上生物量[18-19],两者配施效果更佳[20]。本研究结果表明,与不施用氮肥增效剂的U处理相比,配施氮肥增效剂可显著提高夏玉米产量5.92%~13.82%,提高夏玉米地上生物量5.85%~18.07%,且双效抑制剂处理(U+N+D)效果最好。氮肥配施氮肥增效剂增提高了玉米产量和地上生物量,这可能与氮肥增效剂调控了土壤的供氮强度,减少了氮素损失,进而增加了土壤有效氮素的供应有关[21]。脲酶抑制剂能延缓尿素水解为铵态氮的进程,而硝化抑制剂能抑制铵态氮的硝化作用,二者配施可以使土壤中保持更高的铵态氮含量,更好地满足作物的氮素需求[22]。施用氮肥增效剂和增加灌水量均可以提高作物产量,作物的毛收入随之提高,投入成本也有所增加。本研究中,相较于处理U,施用氮肥增效剂的处理净收益提高11.12%~21.17%;相同施肥措施下,增加灌水量后净收益增加9.18%~19.40%,W2灌水水平下U+N+D处理经济效益增幅最大。

3.2 水分和氮肥增效剂对夏玉米水肥利用的影响

相关研究表明,在一定范围内增加灌水量可以提高作物的产量和水分利用效率[23]。施用氮肥增效剂可以提高作物产量,作物水分利用效率也会随之增长。本研究中,与U处理相比,施用氮肥增效剂的处理水分利用效率均显著提高。与低灌水水平(W1)相比,高灌水水平(W2)下施用氮肥增效剂的处理水分利用效率平均提高5.54%,其中灌水量对U+N+D处理的影响最大。将硝化/脲酶抑制剂结合氮肥施用可调控作物根区氮素供给形态,增加作物生育期内的吸氮量,提高作物氮肥利用效率[24],两者配合施用可以有效延缓尿素水解和水解产物NH_4^+的进一步氧化,使其在土壤中的存蓄时间延长,存储量增加,从而减少氮素损失,提高氮肥利用效率[25]。有研究表明,氮肥结合施用氮肥增效剂可以提高作物氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮素利用率[26-27]。严富来等[28]发现在施氮量一致的情况下,适当增加灌水量可以提高作物氮素利用效率。这与本研究结论一致,即施用氮肥增效剂和增加灌水量均能显著提高氮肥偏生产力和氮素利用效率,且水分与氮肥增效剂的交互作用会显著提高氮肥偏生产力和氮肥农学利用效率。

3.3 水分和氮肥增效剂对夏玉米农田土壤氨挥发累积量和硝态氮残留量的影响

氨挥发是氮肥损失的主要途径之一。土壤氨挥发受到多种因素的影响,如气象条件(温度、降水、风速和光照强度)、土壤因素(土壤类型、理化特性、含水量等)和施肥因素(肥料种类、施肥量、施肥方式及灌溉和施肥时期)等[29]。不少研究表明,氮肥中添加硝化抑制剂会增大氨挥发累积量[30],氮肥中添加脲酶抑制剂和双效抑制剂可以降低氨挥发速率并减少氨挥发累积总量[31-33]。这与本研究结论一致,相较于U处理,U+DCD处理氨挥发累积量增大5.98%~17.36%,U+NBPT处理氨挥发累积量减小14.29%~18.93%,U+N+D处理氨挥发累积量降低6.25%~7.23%;U+NBPT和U+N+D处理第一周氨挥发累积量在氨挥发累积总量中的占比均显著减小。出现这种现象可能是因为脲酶抑制剂延缓了尿素的水解,减少了玉米生育前期土壤中的NH_4^+-N浓度,进而减小了氨挥发速率和氨挥发累积量。苏芳等[34]研究表明,在华北平原冬小麦-夏玉米轮作系统中施肥后进行灌水可以显著降低氨挥发损失。本研究中,与W1相比,W2水平下氨挥发累积量减少5.90%~19.63%,在增加灌水量的情况下施用脲酶抑制剂,减少氨挥发的效果进一步提升,这与Sanz-Cobena[9]等的研究结论相似。

旱地土壤中施入的氮肥有相当一部分最终以硝态氮的形式残留在土壤中,累积在土体中的大量硝态氮存在淋溶损失的倾向,容易造成地下水污染。相关研究表明在氮肥中添加脲酶或硝化抑制剂能提高氮素利用率,减少土壤硝态氮残留[35-36]。本研究结果与之相似,与不施用氮肥增效剂处理U相比,施用氮肥增效剂处理的硝态氮残留量均出现不同程度降低,W1灌水水平下硝态氮残留量降低3.55%~33.58%,W2灌水水平下降低1.97%~40.66%。硝态氮残留量随灌水量的增大而减小,可能是因为灌水量增加造成土壤中有机态氮的增加或氮矿化率的降低[8]。在W2灌水水平下,U+DCD处理硝态氮残留量较多,可能是因为DCD的水溶性较高,灌水量较多时容易发生与NH_4^+的分离现象,甚至发生淋溶损失,影响其硝化抑制效果[37]。施用氮肥增效剂可以显著降低0~60 cm土层土壤硝态氮残留量在0~180 cm土层中硝态氮残留总量的占比,这主要是因为夏玉米的根系主要分布在0~60 cm土层[38],施用氮肥增效剂促进了作物对氮素的吸收利用[39]。0~60 cm土层土壤硝态氮残留量占

比还会随灌水量的增大而减小,60~180 cm 土层土壤硝态氮残留量占比增大,这主要是因为增加灌水量会促进硝态氮向土壤下层迁移,增加氮素淋失的风险[40]。

3.4　水分和氮肥增效剂对夏玉米综合评价的影响

本研究通过选取氨挥发累积量、净收益、硝态氮残留量、产量、水分利用效率、氮肥偏生产力和成熟期地上生物量共 7 个指标,构建灌水及氮肥增效剂施用效果的综合评价体系。一方面,施用氮肥增效剂可以减少氮素损失,增大夏玉米产量和地上生物量,因此施用氮肥增效剂可以提高综合评价得分;另一方面,玉米产量和净收益随灌水量的增加而增加,氨挥发累积量和硝态氮残留量随灌水量的增加而减少,因此综合评价得分随灌水量的增加而提高。本研究综合评价结果表明,在 W1 灌水水平下 N0 处理优于 U 处理,这可能是因为 W1 灌水水平下,相比于 U 处理,N0 处理的硝态氮残留量和氨挥发累积量较低。本研究构建的综合评价体系中,氨挥发累积量和硝态氮残留量权重较高,导致 W1 灌水水平下 N0 处理综合评价得分高于 U 处理,W2 灌水水平下 U 处理与 N0 处理的产量差距进一步加大,氨挥发累积量和硝态氮残留量差距减小,因此 W2 水平下 U 处理综合评价得分高于 N0 处理。

4　结　论

1)与不施用氮肥增效剂处理相比,氮肥配施增效剂可使夏玉米产量和地上生物量分别增加5.92%~13.82%和 5.85%~18.07%,还能提高夏玉米水分利用效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率和氮素利用率,减少夏玉米成熟期土壤中的硝态氮残留。硝化抑制剂会使土壤氨挥发累积量增加5.98%~17.36%,脲酶抑制剂和双效抑制剂可使土壤氨挥发累积量减少 6.25%~18.93%。

2)与 40 mm 生育期灌溉定额相比,60 mm 灌溉定额处理可使夏玉米产量、地上生物量、氮肥偏生产力和氮素利用率分别提高 5.37%~10.54%、5.03%~15.51%、5.38%~10.51%和 5.85%~29.58%,同时减少夏玉米土壤氨挥发累积量和土壤硝态氮残留量。

3)综合考虑经济效益、环境效益、作物生长和水肥利用等因素,灌溉量为 60 mm 时氮肥配施双效抑制剂是关中地区夏玉米实现高产高效的合理灌水施肥措施,适合在关中夏玉米种植中应用推广。

参 考 文 献:

[1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778-783.

[2] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536-545.
ZHAO B Q, ZHANG F S, LIAO Z W, et al. Research on development strategies of fertilier in China[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2004, 10(5): 536-545.

[3] 何浩, 张宇彤, 危常州, 等. 不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 281-287.
HE H, ZHANG Y T, WEI C Z, et al. Effects of different organic substitution reducing fertilizer patterns on maize growth and soil fertility [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 281-287.

[4] 王甄烨, 焉莉, 蒋富琛, 等. 脲酶/硝化抑制剂配施氮肥对春玉米农田氨排放的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 138-143.
WANG Z Y, YAN L, JIANG F C, et al. Effect of urease/nitrification inhibitor combined application of nitrogen fertilizers on ammonia emission from spring corn farmland[J]. Journal of Maize Science, 2022, 30 (1): 138-143.

[5] 宋涛, 尹俊慧, 胡兆平, 等. 脲酶/硝化抑制剂减少农田土壤氮素损失的作用特征[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 585-597.
SONG T, YIN J H, HU Z P, et al. Characteristics of urease/nitrification inhibitors in reducing nitrogen losses in farmland soils[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(4): 585-597.

[6] 徐星凯, 周礼恺, VAN CLEEMPUT O. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37 (3): 339-345.
XU X K, ZHOU L K,VAN CLEEMPUT O. Effect of urease/nitrification inhibitors on the distribution of transformed urea-N forms in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 339-345.

[7] GILL S L, SPURLOCK F C, GOH K S, et al. Vegetated ditches as a management practice in irrigated alfalfa[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 144(1): 261-267.

[8] ALLENDE-MONTALBÁN R, MARTÍN-LAMMERDING D, DELGADO M D M, et al. Urease inhibitors effects on the nitrogen use efficiency in a maize-wheat rotation with or without water deficit[J]. Agriculture, 2021, 11(7): 684.

[9] SANZ-COBENA A, MISSELBROOK T H, ARCE A, et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 126(3/4): 243-249.

[10] 高珊, 郭艳杰, 张丽娟, 等. 温室土壤不同含水量下施用 DCD 和 DMPP 对 N_2O 排放及 NH_3 挥发的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(4): 95-101.
GAO S, GUO Y J, ZHANG L J, et al. Effects of DCD and DMPP on the nitrous oxide emissions and ammonia violation from greenhouse soil under different water contents[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2019, 42(4): 95-101.

[11] YANG X L, LU Y L, DING Y, et al. Optimising nitrogen fertilisation:a key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008-2014)[J]. Field Crops Research, 2017, 206: 1-10.

[12] 赵政鑫, 王晓云, 李府阳, 等. 秸秆还田配施稳定性氮肥对麦玉轮作水氮利用的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 350-360.
ZHAO Z X, WANG X Y, LI F Y, et al. Effects of straw returning and application of stable nitrogen fertilizer on water and nitrogen use efficiencies of wheat maize rotation[J]. Transactions of the Chinese

Society of Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 350-360.

[13] ANTOR N H, MIA S, HASAN M M, et al. Chemically and biologically activated biochars slow down urea hydrolysis and improve nitrogen use efficiency[J]. Pedosphere, 2023, 33(4): 659-669.

[14] XIAO C, ZOU H Y, FAN J L, et al. Optimizing irrigation amount and fertilization rate of drip-fertigated spring maize in northwest China based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Agricultural Water Management, 2021, 257: 107157.

[15] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭, 等. 农田土壤 N_2O 生成与排放影响因素及 N_2O 总量估算的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 119-123.
ZHANG Y M, HU C S, DONG W X, et al. The influencing factors of production and emission of N_2O from agricultural soil and estimation of total N_2O emission[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(3): 119-123.

[16] 李灿, 胡田田, 吴勇, 等. 滴灌施肥技术参数对苹果品质的影响及综合评价[J]. 果树学报, 2021, 38(4): 497-508.
LI C, HU T T, WU Y, et al. Effects of drip fertigation technical parameters onapple fruit quality and comprehensive evaluation[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(4): 497-508.

[17] WU X L, HU F. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Ecological Indicators, 2020, 113: 106243.

[18] 宋以玲, 贺明荣, 张吉旺, 等. 硝化抑制剂型包膜肥料对玉米生理特性、产量、品质的影响[J]. 河北科技师范学院学报, 2015, 29(1): 6-11, 80.
SONG Y L, HE M R, ZHANG J W, et al. Effects of nitrification inhibitor fly ash coated slow release fertilizer on physiological characteristics yield and quality of maize[J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2015, 29(1): 6-11, 80.

[19] 韩宝文, 贾良良, 肖焱波, 等. 脲酶抑制剂对夏玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(4): 116-120.
HAN B W, JIA L L, XIAO Y B, et al. Effects of urease inhibitor on summer maize yield and N use efficiency[J]. Journal of Maize Science, 2011, 19(4): 116-120.

[20] 胡田田, 崔晓路, 李梦月, 等. 不同氮肥增效剂和水氮用量对冬小麦产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 302-310.
HU T T, CUI X L, LI M Y, et al. Effect of different nitrogen fertilizer synergists, water and nitrogen amount on winter wheat yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 302-310.

[21] 焦晓光, 梁文举, 陈利军, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1903-1906.
JIAO X G, LIANG W J, CHEN L J, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil available N and microbial biomass N and on N uptake of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1903-1906.

[22] 刘欢, 陈苗苗, 孙志梅, 等. 氮肥调控对小麦/玉米产量、氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 232-238.
LIU H, CHEN M M, SUN Z M, et al. Effects of different nitrogen management practice on crop yield, N utilization and N apparent balance in wheat/maize rotation system[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(1): 232-238.

[23] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27-32.
WANG S F, ZHANG X Y, PEI D. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 27-32.

[24] 刘晓伟, 王火焰, 朱德进, 等. 氮肥施用方式对水稻产量以及氮、磷、钾养分吸收利用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(2): 203-210.
LIU X W, WANG H Y, ZHU D J, et al. Effect of N fertilization method on rice yield and N, P and K uptake and use efficiency[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, 40(2): 203-210.

[25] 王静, 王允青, 张凤芝, 等. 脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 211-216.
WANG J, WANG Y Q, ZHANG F Z, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on yield and nitrogen utilization efficiency of rice andsoil nitrogen of paddy field in plain along the huaihe river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 211-216.

[26] 李玉, 王茂莹, 张倩, 等. 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长的影响及其机理研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 283-289.
LI Y, WANG M Y, ZHANG Q, et al. Effects of coated urease inhibitor synergicurea on wheat growth and its mechanism[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 283-289.

[27] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827-3839.
LIU Z H, WU X B, TAN D S, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3827-3839.

[28] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 283-293.
YAN F L, ZHANG F C, FAN X K, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer supply on yield and nitrogen absorption and utilization efficiency of spring maize in sandy soil area in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 283-293.

[29] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149-162.
LU L L, WU G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 149-162.

[30] TRENKEL M E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture[M]. 2th ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.

[31] SILVA A G B, SEQUEIRA C H, SERMARINI R A, et al. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: ameta-analysis[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(1): 1-13.

[32] SINGH J, KUNHIKRISHNAN A, BOLAN N S, et al. Impact of urease inhibitor on ammonia and nitrous oxide emissions from temperate pasture soil cores receiving urea fertilizer and cattle urine[J]. Science of the Total Environment, 2013, 465: 56-63.

(下转第 168 页)