doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.043

干旱盐渍化地区控释肥水氮耦合效应与制度优化

李仙岳[1]　辛懋鑫[1]　史海滨[1]　闫建文[1]　赵春燕[1]　郝云凤[2]

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;
2. 巴彦淖尔市农牧业科学研究院, 巴彦淖尔 015000)

摘要: 为探索盐渍化地区控释肥水氮耦合效应及优化组合方案,提高水氮利用效率,减少硝态氮流失,2019 年和 2020 年在河套灌区开展了控释肥施用农田不同水氮配比试验,研究了盐渍化地区向日葵产量和水氮利用效率对控释肥与传统肥料的响应差异,以及控释肥不同水氮配比对向日葵产量和水氮利用效率的影响,构建了向日葵经济效益与水氮交互作用的数学回归模型,并优化了水氮组合方案。结果表明:与传统肥料相比,控释肥处理产量、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和灌溉水生产效率平均增加了 13.89%、46.42%、13.61% 和 13.62%($P<0.05$),收获指数差异不显著($P>0.05$)。控释肥施用条件下,不同水氮处理交互作用明显,控水灌溉限制了氮素利用,充分灌溉条件下向日葵产量、氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力平均增长了 21.87%、80.89% 和 21.53%;低氮同样降低了水分利用效率,从低氮到中氮,向日葵产量和灌溉水生产效率平均增长了 14.83% 和 15.35%,从中氮到高氮平均增长了 3.86% 和 3.43%。2 年最高产量均为高水高氮处理,分别为 3 943.5、3 788.7 kg/hm^2。控释肥施用条件下,灌水量、施氮量与向日葵经济效益之间符合二元二次回归模型,2 年预测经济效益与实际经济效益决定系数 R^2 均为 0.99,通过主因素分析,经济效益随施氮量的增加先增加后减小,通过模拟寻优及综合各项指标分析,控释肥充分灌溉条件下中氮水平经济效益在 18 000 ~ 21 000 元/hm^2 之间,是本试验最优处理,在增产的同时可以减少氮素流失。研究可为河套灌区向日葵种植、减少农田面源污染提供技术参考。

关键词: 向日葵; 控释肥; 水氮耦合; 产量; 水氮利用效率; 回归模型

中图分类号: S143.1$^+$5; S565.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0397-10　　**OSID**:

Coupling Effect and System Optimization of Controlled-release Fertilizer and Water in Arid Salinized Areas

LI Xianyue[1]　XIN Maoxin[1]　SHI Haibin[1]　YAN Jianwen[1]　ZHAO Chunyan[1]　HAO Yunfeng[2]

(1. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Huhhot* 010018, *China*
2. *Bayannur Institute of Agriculture and Animal Husbandry Research*, *Bayannur* 015000, *China*)

Abstract: In order to explore the salinization area controlled release nitrogen fertilizer coupling effect and optimum combination plan, improve the utilization efficiency of water and nitrogen, nitrate nitrogen loss reduction, a test of controlled release fertilizer application fields with different water and nitrogen ratios was conducted in 2019 and 2020 in Hetao Irrigation District, and the salinization of sunflower water yield and nitrogen use efficiency of controlled release fertilizer and traditional fertilizer were investigated. The effects of different water and nitrogen ratios of controlled release fertilizer on sunflower yield and water and nitrogen use efficiency were explored, and the mathematical regression model of interaction between economic benefit and water and nitrogen was established, and the water and nitrogen combination scheme was optimized. The results showed as follows: compared with traditional fertilizer, yield, nitrogen agronomic efficiency, partial nitrogen productivity and irrigation water efficiency of controlled release fertilizer were increased by 13.89%, 46.42%, 13.61% and 13.62% on average ($P<0.05$), but there was no significant difference in harvest index ($P>0.05$). Under controlled release fertilizer application, the interaction of different water and nitrogen treatments was obvious, and controlled irrigation limited nitrogen use efficiency. Sunflower yield, nitrogen fertilizer agricultural utilization

收稿日期: 2021-08-30　修回日期: 2021-09-30

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(zdzx2018059)和国家自然科学基金项目(52079064、51969024)

作者简介: 李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱节水灌溉理论与技术研究,E-mail: lixianyue80@126.com

efficiency and nitrogen fertilizer partial productivity were increased by 21.87%, 80.89% and 21.53%, respectively. Low N also reduced water use efficiency. From low N to medium N, sunflower yield and irrigation water use efficiency were increased by 14.83% and 15.35% on average, and from medium N to high N it was increased by 3.86% and 3.43% on average, respectively. The maximum yields in 2 a were 3 943.5 kg/hm^2 and 3 788.7 kg/hm^2 under high water and high nitrogen treatments, respectively. Under the condition of controlled release fertilizer application, the relationship between irrigation amount, nitrogen application amount and economic benefit of sunflower was in line with binary quadratic regression model. The determination coefficient R^2 of the predicted economic benefit and actual economic benefit in two years was 0.99. Through principal factor analysis, economic benefit was increased first and then decreased with the increase of nitrogen application amount. Under the condition of full irrigation of controlled release fertilizer, the economic benefit of medium nitrogen level was between 18 000 yuan/hm^2 and 21 000 yuan/hm^2, which was the optimal treatment in this experiment. It can increase yield and reduce nitrogen loss, and provide technical reference for sunflower planting and reducing farmland non-point source pollution in Hetao Irrigation District.

Key words: sunflower; controlled-release fertilizer; water nitrogen coupling; yield; water and fertilizer utilization efficiency; regression model

0 引言

近年来为了追求粮食高产,化肥的使用量逐年增加,同时由于灌水、施肥等农业管理措施不合理和尿素、磷酸二铵复合肥等传统肥料的施用,导致氮素流失加剧,降低了氮肥利用率,并引起了灌区生态系统退化、灌区内部及邻近水体污染加剧等一系列环境问题[1]。氮肥与水资源均是影响农业生产的重要因素,然而目前传统氮肥平均有效利用率仅为35%[2],大量的氮素随灌溉水进入土壤和地下水,导致湖泊富营养化并造成面源污染[3]。控释肥通常采用聚合物包衣封装氮,并利用膜的渗透压将氮素排到膜外,释放速度可人为设定,解决了传统肥料施入土壤后,前期由于氮素释放快导致过量,而后期又缺氮的现象。控释肥实际上相当于持续缓慢地为作物供氮。因此,与传统肥料相比,控释氮肥氮素利用率显著提高,同时明显降低了农业面源污染,可见施用控释肥对于推动绿色农业、生态农业发展具有重要意义。

目前在控释肥施用农田中,针对提高肥效、减少养分流失、降低氮挥发等方面进行了大量研究,结果表明控释肥在增产、提高肥料利用率等方面比传统肥料有更优异的效果[4-6]。向日葵农田中,施用缓释尿素比普通尿素可以增产 0.7% ~ 5.8%,氮素利用率提高 1.8% ~1.9%[7]。小麦农田中,与传统尿素肥料相比,施入相同氮量控释肥使小麦产量、地上生物量和氮素利用率分别提高 9.1% ~ 15.1%、11.7% ~ 15.0% 和 16.5% ~ 68.7%[8]。另外,在马铃薯玉米套作农田中,控释氮肥提高了耕层土壤速效氮含量,显著降低了氮素淋失,使耕层以下土层的硝态氮含量平均减少 28.6%,氮肥表观利用率平均提高了 16.3%[9]。此外,通过优化水氮组合模式能进一步提高水氮利用效率。宋娜等[10]对不同水氮条件下马铃薯产量、水分利用效率和品质进行研究,结果表明土壤湿润比为 70%、施氮量 180 kg/hm^2 是马铃薯生产的适宜水氮组合。宋明丹等[11]建立了不同水氮条件下冬小麦干物质积累量和产量的 RICHARDS 方程,结果表明灌水能显著延长小麦干物质量积累的时间,施氮量为 210 kg/hm^2 的冬小麦可以获得较高的干物质积累量和产量。对于盐渍化地区,鲁耀泽等[12]研究了河套灌区不同水氮用量对向日葵产量的影响,并通过隶属函数对产量、生长性状和水分利用效率等指标进行综合评价,结果表明中水中氮为最优处理。但这些研究主要针对传统肥料,对于控释肥条件下,不同水氮组合对作物生长和水氮利用效率的研究较少。李梦月等[13]对比了60 d 和 120 d 释放期的控释肥不同水氮组合对冬小麦的综合影响,发现灌水量、施氮量、肥料类型和两两交互作用对小麦干物质量和产量有显著影响,当灌水量为 47.72 ~ 52.28 mm、控释肥施用量为159.23 ~ 199.47 kg/hm^2,可达到增产节肥节水效果。尽管大量学者研究了控释肥施用对作物产量、水氮利用效率的影响[14],但是针对盐渍化地区,控释肥施用条件下水氮耦合及其制度优化研究相对较少。

本文主要针对干旱盐渍化地区,研究控释肥农田的水氮组合模式对向日葵产量、水氮利用效率和经济效益的影响;基于二元二次回归模型构建干旱盐渍化地区控释肥水氮耦合与经济效益之间的数学模型,并进行方案优化,提出盐渍化地区控释肥农田水氮优化方案,为干旱盐渍化地区水氮高效利用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古河套灌区巴彦淖尔市农牧业科学研究院内试验田(107°16′42″E,40°47′54″N),该地区属于中温带半干旱大陆性气候,年降水量138.8 mm,平均气温 6.8℃,昼夜温差大,日照时间长,年日照时间为 3 229.9 h,光、热、水同期,无霜期为 130 d 左右。试验区土壤以粉砂壤土为主,0 ~ 100 cm 土层平均容重为 1.41 g/cm^3,有机质平均质量比 6.19 g/kg,水解性氮平均质量比 34.43 mg/kg,速效磷平均质量比 1.84 mg/kg,速效钾平均质量比 113.04 mg/kg。2019—2020 年试验期间降雨量、灌水量和参考蒸散量如图 1 所示。

1.2　试验设计

供试作物为向日葵,品种为 SH361,机械覆膜,人工种植,种植模式为一膜两行,向日葵株距和行距分别为 0.4、0.9 m,种植密度约 27 777 株/hm^2,分别在 2019 年 6 月 2 日和 2020 年 5 月 22 日播种,并于当年 10 月 8 日和 9 月 24 日收获,生育期分别为 128、125 d。试验采用二因素裂区设计,主区为控释肥施氮处理,设置 3 个施氮量(纯氮)处理:135 kg/hm^2(低氮,N1)、225 kg/hm^2(中氮,N2)、315 kg/hm^2(高氮,N3);副区为灌水处理,设置 2 个灌水处理:控水灌溉(W1,播前 120 mm,现蕾期 60 mm)、充分灌溉(W2,播前 240 mm,现蕾期 120 mm),其中控水灌溉为当地推荐的适宜灌溉,充分灌溉为当地农户常规灌溉。另外设置传统肥料处理作为对照,只设置充分灌溉条件下低、中、高氮处理(CK1、CK2、CK3),并设置一个充分灌溉不施氮处理(CK4)作为计算氮肥利用效率依据,共计 10 个处理。每个处理 3 次重复,共 30 个小区(表 1),每个小区面积 24 m × 6 m,小区之间设置塑料薄膜进行隔离,防止水盐氮交互影响。试验所用控释肥料为芦阳第六代控释肥(N、P、K 质量比为 14∶6∶5),控释肥在播前机械覆膜时施入农田。传统肥料以磷酸二铵为基肥(含 N 18%,P_2O_5 46%),在播前覆膜时施入农田;追肥为尿素(含 N 46%),在现蕾期灌水前进行人工施撒,各处理施用肥料时按照氮质量分数进行换算。灌溉方式采用黄河水畦灌,使用水表计量。所有其他田间管理均保持一致。

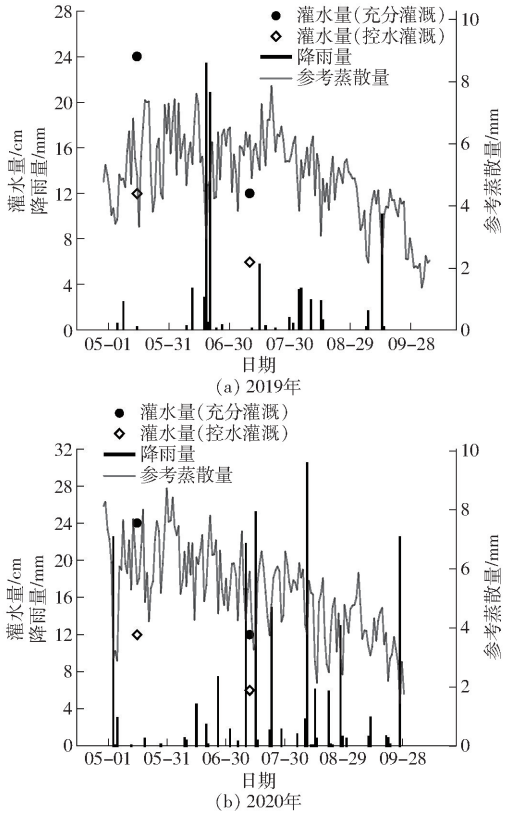

图 1　作物生育期内降雨量、灌水量、参考蒸散量

Fig. 1　Rainfall, irrigation and reference evapotranspiration during crop growth period

表 1　试验因素编码与试验设计

Tab. 1　Test factors coding and test design

处理	氮肥处理	纯氮量/(kg·hm^{-2})	灌水处理	播前灌水量/mm	现蕾期灌水量/mm	施氮量编码值 x_1	灌水量编码值 x_2
W1N1	控释肥低氮	135	控水灌溉	120	60	−1	−1
W1N2	控释肥中氮	225	控水灌溉	120	60	0	−1
W1N3	控释肥高氮	315	控水灌溉	120	60	1	−1
W2N1	控释肥低氮	135	充分灌溉	240	120	−1	1
W2N2	控释肥中氮	225	充分灌溉	240	120	0	1
W2N3	控释肥高氮	315	充分灌溉	240	120	1	1
W2CK1	基肥 45 kg/hm^2 + 追肥 90 kg/hm^2	135	充分灌溉	240	120		
W2CK2	基肥 75 kg/hm^2 + 追肥 150 kg/hm^2	225	充分灌溉	240	120		
W2CK3	基肥 105 kg/hm^2 + 追肥 210 kg/hm^2	315	充分灌溉	240	120		

1.3　测试项目及方法

(1) 主要观测指标

气象数据:利用试验田附近的自动气象站获取,包括太阳辐射、气温、相对湿度、气压、风速和降水量,作物参考蒸散量使用 FAO Penman − Monteith 公式[15]进行计算。

干物质积累量(kg/hm²):在成熟期将所取向日葵植株从茎基部与地下部分分离,去掉表面尘土,称其鲜质量,再放入干燥箱中 105℃杀青 1 h,75℃恒温干燥至质量恒定,放入干燥器中冷却,用电子天平称量。每小区取 3 株向日葵测定求平均值。

产量(kg/hm²):作物成熟期在每个小区选取长势一致的作物群体,连续取 10 株向日葵,脱粒后风干进行考种,计算籽粒结实率,称量百粒质量,折算为每公顷产量。

(2)水氮利用效率计算

收获指数(HI,%)计算公式为

$$HI = Y_n / Y_B \times 100\% \tag{1}$$

式中 Y_n——施氮处理成熟期籽粒产量,kg/hm²

Y_B——干物质积累量,kg/hm²

氮肥偏生产力(NPFP,kg/kg)计算公式为

$$NPFP = Y_n / F_n \tag{2}$$

式中 F_n——施氮量,kg/hm²

氮肥农学利用率(NAE,kg/kg)计算公式为

$$NAE = (Y_n - Y_0) / F_n \tag{3}$$

式中 Y_0——不施氮区成熟期籽粒产量,kg/hm²

灌溉水生产效率(IWUE,kg/m³) 计算公式为

$$IWUE = Y_n / I \tag{4}$$

式中 I——灌溉水总量,m³/hm²

(3)水氮耦合模型

本试验研究控释肥施氮量、灌水量与向日葵经济效益之间的回归关系,以向日葵经济效益为目标,以施氮量与灌水量为自变量,基于二元二次回归方程建立经济效益回归模型。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据分析,SPSS 22.0 软件进行多因素交互作用(肥料类型、灌水量和施氮量)方差分析,并基于 Duncan 法比较处理间在 $P = 0.05$ 水平上的差异显著性,采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对产量及其构成因素的影响

合理的水氮制度是作物高产的基础,方差结果显示水氮和肥料类型对产量和百粒质量有显著或极显著影响,由于干旱区蒸散量大,灌水量是影响向日葵产量的首要因素,其次是施氮量和肥料类型。水氮交互作用和三因素交互作用对产量与百粒质量影响不显著。

百粒质量是产量构成的重要因素,2 年不同处理间差异表现一致,不同处理百粒质量处于 12.34 ~ 16.21 g 之间。充分灌溉条件下,百粒质量随着施氮量的增加先增大后减小,不同施氮量之间差异不显著。控释肥处理百粒质量 2 年平均比传统肥料处理高 3.51%。相同施氮量条件下,充分灌溉处理百粒质量显著高于控水灌溉处理,灌水和施用控释肥均可以显著提高向日葵百粒质量。

作物产量是衡量水氮耦合优劣的主要指标。2 年不同处理产量处于 2 626.05 ~ 3 943.50 kg/hm² 之间,施氮处理 2 年产量基本一致且有不同程度的增产,充分灌溉条件下,产量随施氮量的增加逐渐增加,从低氮到中氮,2 年产量平均增加了 14.83%,从中氮到高氮增加了 3.86%,产量增加幅度逐渐减小,说明施氮量超过一定数值(225 kg/hm²)后,过多的增施氮肥不会引起产量明显的增加。控释肥处理产量显著高于传统肥料处理,2 年平均高 13.89%。相同施氮量条件下,不同灌水量之间差异显著,随着灌水量的增大,产量显著增加,充分灌溉比控水灌溉 2 年产量平均提高 21.87%。2 年产量最大为 W2N3 处理,分别为 3 943.5、3 788.7 kg/hm²,比 W1N3、W2N1、W2N2 和 W2CK3 2 年平均高 23.57%、20.64%、5.21% 和 23.18%。可见,对于干旱盐渍化地区控释肥施用农田,灌水、施氮和肥料类型均对产量形成有显著影响。增加灌水量可以补偿由于肥料不足导致的产量降低,显著提高向日葵产量。增施氮肥同样可以提高产量,但施用量超过一定数值(225 kg/hm²)后,继续增加施氮量对于产量增加无明显促进作用(图 2,图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))。

2.2 水氮耦合对水氮利用效率的影响

保证作物高产的同时,提高水氮利用效率可以减少水分流失和肥料对农田环境的污染。2 年结果显示灌水量、施氮量、肥料类型和三因素交互作用对水氮利用效率均有显著或极显著的影响(表 2)。

收获指数反映向日葵地上部干物质分配情况,由方差分析可知,收获指数主要受灌水影响,充分灌溉处理收获指数高于控水灌溉处理 12.28%。在充分灌溉条件下,收获指数随着施氮量增加逐渐增加,从低氮到高氮,收获指数 2 年平均提高了 5.43%。控释肥处理产量高于传统肥料处理(图 2),而收获指数较传统肥料低 11.88%,说明控释肥料可以增加作物干物质积累量,从而达到增产的目的。氮肥农学利用率反映增施氮肥的增产效果,氮肥偏生产力反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量的综合效应。受灌水量、施氮量和肥料类型影响显著,氮肥农学利用率和偏生产力 2 年规律相同,均随着施氮量的增加逐渐减小。从低氮到高氮,氮肥农学利用

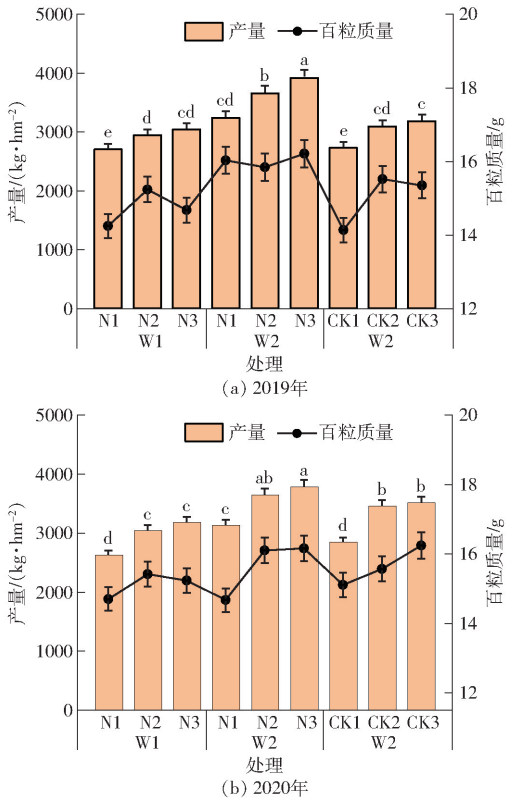

图 2　控释肥施用水氮耦合效应对向日葵产量及构成因素的影响

Fig. 2　Effects of coupling effect of controlled release fertilizer on yield and component factors of sunflowers

率和偏生产力 2 年平均降低了 24.32% 和 48.89%。说明增施氮肥，向日葵增产效果逐渐减弱，氮肥单位生产力也逐渐降低。控释肥处理氮肥农学利用率和偏生产力较传统肥料处理 2 年平均提高 46.42% 和 13.61%。相同施氮条件下，氮肥农学利用率和偏生产力与灌水量呈正相关，充分灌溉处理高于控水灌溉处理 80.89% 和 21.53%。说明在满足向日葵水分需求后，氮肥农学利用率和氮肥偏生产力会显著提高。氮肥农学利用率和偏生产力最大均为 W2N1 处理，相对于 W1N1、W2N2、W2N3 和 W2CK1，氮肥农学利用率提高了 92.73%、15.07%、43.43% 和 62.68%，氮肥偏生产力提高了 19.05%、45.01%、93.04% 和 14.53%。灌溉水生产效率主要受灌水量影响，控水灌溉灌溉水生产效率高于充分灌溉 41.1%。在充分灌溉条件下，控释肥处理高于传统肥料处理 13.62%，从低氮到中氮，灌溉水生产效率 2 年平均提高了 15.35%，从中氮到高氮，2 年平均提高了 3.43%。说明控释肥料与水分耦合效应优于传统肥料。水氮具有相互促进作用，增施氮肥会提高灌溉水生产效率，增加灌水同样会提高氮肥利用效率与收获指数。

充分灌溉产量和水氮利用效率处理显著高于控制灌溉处理（$P<0.05$），控释肥处理产量和水氮利

表 2　控释肥施用水氮耦合对向日葵水氮利用效率的影响

Tab. 2　Effect of water nitrogen coupling on utilization efficiency of sunflower water and fertilizer

年份	处理	收获指数/%	氮肥农学利用率/(kg·kg⁻¹)	氮肥偏生产力/(kg·kg⁻¹)	灌溉水生产效率/(kg·m⁻³)
2019	W1N1	(18.11 ± 0.42)^{c}	(4.42 ± 0.10)^{abc}	(20.18 ± 0.47)^{b}	(151.32 ± 3.49)^{b}
	W1N2	(22.58 ± 0.52)^{b}	(3.75 ± 0.09)^{bc}	(13.21 ± 0.31)^{de}	(165.10 ± 3.81)^{a}
	W1N3	(19.39 ± 0.45)^{c}	(2.94 ± 0.07)^{c}	(9.69 ± 0.22)^{f}	(169.64 ± 3.92)^{a}
	W2N1	(22.51 ± 0.52)^{b}	(8.35 ± 2.46)^{ab}	(24.11 ± 0.56)^{a}	(90.41 ± 2.09)^{d}
	W2N2	(23.56 ± 0.54)^{b}	(6.91 ± 0.16)^{a}	(16.36 ± 0.38)^{c}	(102.27 ± 2.36)^{c}
	W2N3	(24.09 ± 0.56)^{ab}	(5.72 ± 0.13)^{ab}	(12.47 ± 0.29)^{e}	(109.14 ± 2.52)^{c}
	W2CK1	(25.25 ± 0.58)^{a}	(4.50 ± 0.10)^{abc}	(20.26 ± 0.47)^{b}	(75.97 ± 1.75)^{e}
	W2CK2	(23.53 ± 0.54)^{b}	(4.46 ± 0.10)^{abc}	(13.91 ± 0.32)^{de}	(86.93 ± 2.01)^{d}
	W2CK3	(22.67 ± 0.52)^{b}	(3.44 ± 0.08)^{bc}	(10.19 ± 0.24)^{f}	(89.17 ± 2.06)^{d}
2020	W1N1	(19.37 ± 0.45)^{f}	(3.77 ± 0.09)^{f}	(19.48 ± 0.45)^{c}	(146.07 ± 3.37)^{b}
	W1N2	(19.95 ± 0.46)^{ef}	(4.17 ± 0.10)^{e}	(13.59 ± 0.31)^{e}	(169.85 ± 3.92)^{a}
	W1N3	(19.47 ± 0.45)^{ef}	(3.32 ± 0.08)^{f}	(10.05 ± 0.23)^{g}	(175.91 ± 4.06)^{a}
	W2N1	(19.71 ± 0.46)^{ef}	(7.41 ± 0.17)^{a}	(23.11 ± 0.53)^{a}	(86.67 ± 2.00)^{d}
	W2N2	(21.12 ± 0.49)^{de}	(6.78 ± 0.16)^{b}	(16.20 ± 0.37)^{de}	(101.28 ± 2.34)^{c}
	W2N3	(22.04 ± 0.51)^{cd}	(5.26 ± 0.12)^{d}	(11.99 ± 0.28)^{f}	(104.93 ± 2.42)^{c}
	W2CK1	(23.60 ± 0.55)^{c}	(5.30 ± 0.12)^{d}	(21.00 ± 0.49)^{b}	(78.76 ± 1.82)^{d}
	W2CK2	(25.55 ± 0.59)^{b}	(5.99 ± 0.14)^{c}	(15.41 ± 0.36)^{de}	(96.33 ± 2.22)^{c}
	W2CK3	(27.42 ± 0.63)^{a}	(4.43 ± 0.10)^{e}	(11.16 ± 0.26)^{fg}	(97.64 ± 2.25)^{c}
F	灌水量	40.058 **	716.078 **	50.015 **	528.107 **
	施氮量	5.893 *	91.726 **	329.487 **	36.124 *
	肥料类型	0.66	541.702 **	10.399 **	5.415 *
	灌水量 × 施氮量	9.31 **	1.10	0.86	1.77
	灌水量 × 施氮量 × 肥料类型	5.298 *	16.403 **	1.26	0.10

注：同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著；* 表示差异显著（$P<0.05$），** 表示差异极显著（$P<0.01$）。

用效率显著高于传统肥料处理($P<0.05$),控释肥处理中氮水平产量和水氮利用效率显著高于低氮处理($P<0.05$),与高氮无显著差异($P>0.05$),综合产量与水氮利用效率,W2N2 为本试验最优水氮处理。

2.3 水氮耦合模型与方案优化

2.3.1 水氮耦合方程建立

为了优化河套灌区控释肥施用水氮制度,根据表 3 建立控释肥施用条件下水氮制度与经济效益的二元二次回归方程(施氮量(x_1)和灌水量(x_2)水平编码如表 1),2019 年经济效益回归方程为

$$y=19\,109.48+416.48x_1+2\,517.28x_2+637.14x_1x_2-639.92x_1^2 \quad (5)$$

2020 年经济效益回归方程为

$$y=19\,294.29+769.46x_1+1\,992.44x_2+222x_1x_2-1\,319.24x_1^2 \quad (6)$$

经检验,2 年方差检验量 F 为 12 854.67($P<0.01$)和 276.15($P<0.05$),决定系数 R^2 均为 0.99。模型系数差异极显著,该模型能确切反映经济效益随水氮用量的变化过程。

表 3 向日葵农田收入与支出统计

Tab. 3 Statistical results of income and expenditure of sunflower farmland 元/hm²

年份	施氮水平	灌水水平	氮肥投入	水分投入	其他费用	总收入	经济效益
2019	N1	W1	2 160	185.4	1 630	20 156.49	16 181.09
	N2		3 600	185.4	1 630	21 991.32	16 575.92
	N3		5 040	185.4	1 630	22 595.16	15 739.76
	N1	W2	2 160	370.8	1 630	24 085.89	19 925.09
	N2		3 600	370.8	1 630	27 243.84	21 643.04
	N3		5 040	370.8	1 630	29 073.12	22 032.32
2020	N1	W1	2 160	185.4	1 630	19 457.19	15 481.79
	N2		3 600	185.4	1 630	22 624.02	17 208.62
	N3		5 040	185.4	1 630	23 432.10	16 576.70
	N1	W2	2 160	370.8	1 630	23 090.22	18 929.42
	N2		3 600	370.8	1 630	26 980.77	21 379.97
	N3		5 040	370.8	1 630	27 953.13	20 912.33

2.3.2 单因素及边际效应分析

由于灌水量只有 2 个水平,故只对施氮量进行分析。对式(5)、(6)进行降维处理,将灌水量设为零水平,可得到 2019 年和 2020 年施氮量的单因素效应函数式

$$y=19\,109.48+416.48x_1-639.92x_1^2 \quad (7)$$

$$y=19\,294.29+769.46x_1-1\,319.24x_1^2 \quad (8)$$

施氮量的效应如图 3a 所示。由图 3a 可知,2019 年和 2020 年的经济效益随着施氮量变化的曲线为开口向下的抛物线,施氮量对经济效益的影响为正效应,但随施氮量的增加,产量增加越来越缓慢,甚至出现降低,符合报酬递减效应,存在经济效益最大值点。2019 年,当 $x_1=0.33$ 时,对应施氮量为 254.70 kg/hm²,向日葵经济效益达到最大值,为 19 177.23 元/hm²。当 $x_1<0.33$ 时,向日葵经济效益随施氮量的增加而增加,当 $x_1>0.33$ 时,向日葵经济效益随施氮量增加而降低。2020 年,当 $x_1=0.29$ 时,对应施氮量为 251.10 kg/hm²,向日葵经济效益达到最大值,为 19 406.55 元/hm²。当 $x_1<0.29$ 时,向日葵经济效益随施氮量的增加而增加,当 $x_1>0.29$ 时,向日葵经济效益随施氮量增加而降低。2019 年和 2020 年的施氮量变化曲线规律说明,在一定范围内施氮量的增加有利于增加向日葵经济效益,而过量施氮会降低向日葵经济效益。

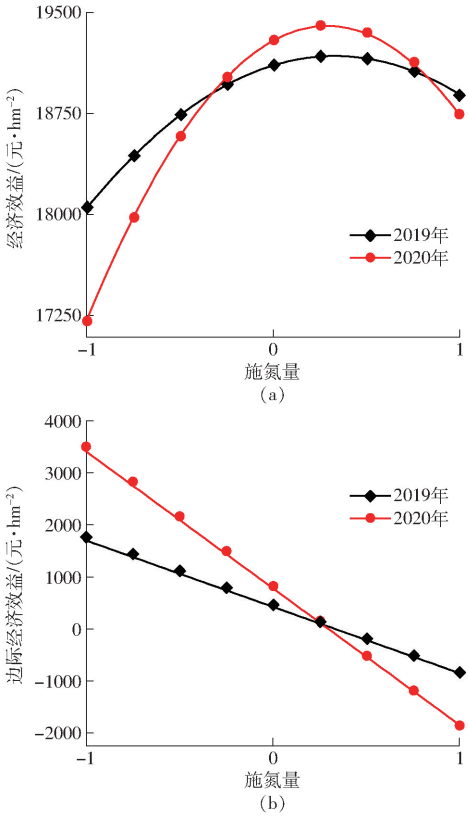

图 3 单因素效应对经济效益影响的效应曲线

Fig. 3 Effect curves of single-factor effect on economic benefits

边际产量可反映施氮量的最适投入量和单位水平投入量变化对向日葵经济效益增加或减少速率的影响,施氮量在不同水平时的边际效应可通过对式(7)、(8)求导得出,得到 2019 年和 2020 年施氮量的边际效应方程式为

$$dy/dx_1=416.48-1\,279.84x_1 \quad (9)$$

$$dy/dx_1=749.46-2\,638.48x_1 \quad (10)$$

根据 2 年边际效应函数绘制出对应的边际效应

图(图 3b)。可以看出,随着施氮量的增加,边际经济效益呈现递减趋势,直到出现负增长。2019 年,当 $x_1 < 0.33$ 时,施氮会增加向日葵经济效益,当 $x_1 > 0.33$ 时,施氮会减少向日葵经济效益。2020 年,当 $x_1 < 0.29$ 时,施氮会增加向日葵经济效益,当 $x_1 > 0.29$ 时,施氮会降低向日葵经济效益。

2.3.3　水氮交互作用分析

向日葵经济效益受水氮两因素共同作用影响,它们之间存在着相互促进或相互抑制的关系。灌水量和施氮量的交互项系数为正值,说明灌水量和施氮量间存在相互促进作用。图 4 为灌水量和施氮量对向日葵经济效益的互作效应三维关系及其二维投影。可以看出,当灌水量一定时,向日葵的经济效益随施氮量的增加呈先上升后下降的趋势;当施氮量一定时,向日葵的经济效益随灌水量的增加呈上升趋势。

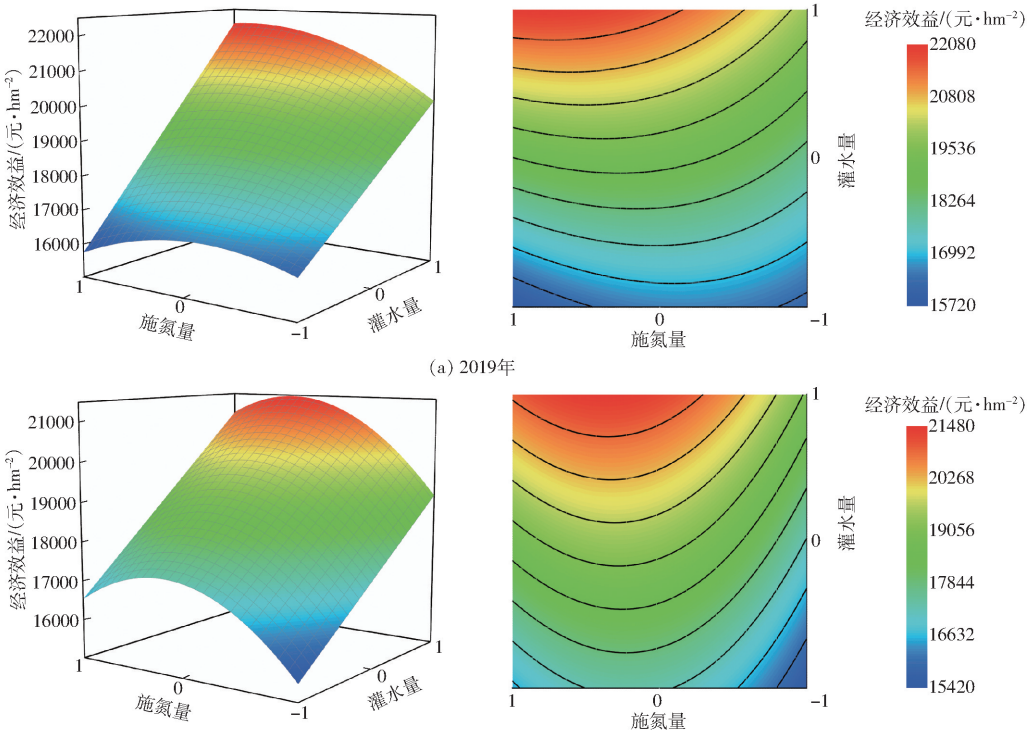

图 4　水氮耦合对向日葵经济效益的影响

Fig. 4　Effect of water nitrogen coupling on economic benefits of sunflower

2019 年,当 $x_1 = 0.82$, $x_2 = 1$,即施氮量为 258.30 kg/hm^2,灌水量为 360 mm,经济效益模拟最大值可达到 22 060.50 元/hm^2,2020 年,当 $x_1 = 0.38$, $x_2 = 1$,即施氮量为 298.80 kg/hm^2,灌水量为 360 mm,经济效益模拟最大值可达到 21 473.10 元/hm^2,由此可见,灌水量与施氮量间有很好的耦合作用,最大经济效益出现在充分灌溉条件下中高施氮水平。

2.3.4　水氮制度优化

为得出 2 年控释肥施用条件下,向日葵不同目标经济效益下的最优水氮组合方案,采用频数法对式(5)、(6)进一步分析,在 -1 ~ 1 之间等距取 5 个水平(-1、-0.5、0、0.5、1)。通过模拟求得,在所得的 50 套组合方案中,向日葵经济效益在 15 000 ~ 18 000 元/hm^{2}的方案有 19 套,经济效益在 18 000 ~ 21 000 元/hm^{2}的方案有 26 套,经济效益在 21 000 ~ 22 500 元/hm^{2}的方案有 5 套。其优化组合方案见表 4,寻优过程中均值、标准差和 95% 置信区间的计算公式从略。

表 4　目标经济效益寻优方案

Tab. 4　Target economic benefit optimization plan

目标效益/(元·hm^{-2})	2019 年		2020 年	
	施氮量/(kg·hm^{-2})	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm^{-2})	灌水量/mm
15 000 ~ 18 000	161.19 ~ 234.00	206.19 ~ 279.90	174.33 ~ 244.80	198.90 ~ 228.60
18 000 ~ 21 000	209.88 ~ 258.12	309.51 ~ 351.90	174.33 ~ 244.80	291.06 ~ 328.59
21 000 ~ 22 500	253.71 ~ 276.12	348.48 ~ 361.80	236.88 ~ 282.60	346.5 ~ 357.30

3　讨论

水分和氮素是作物生长发育的重要营养元素[16],二者的交互关系与作物生长密切相关,适宜的水氮配比可以有效发挥肥效,促进作物生长发育,

提高作物干物质积累量和产量,同时可以显著提高水氮利用效率,减少氮素及水分淋失[17],降低因氮肥过量施用导致的浅层地下水污染和地表水体富营养化风险[18]。另一方面,农田氮素利用效率与肥料类型也密切相关,国内外大量研究表明,控释肥作为一种可以按照设定速率及周期释放养分的化学肥料,可以减少氮素淋失、提高产量及水氮利用效率[19]。王文岩等[20]通过对小麦进行 3 年连续试验,发现与传统肥料相比,控释肥处理 3 年年均产量最高,无论氮肥用量多少,控释肥料均能提高小麦产量。本研究通过 2 年试验,同样发现在相同水氮条件下,控释肥施用相对于传统肥料可以显著提高向日葵产量,产量相对于传统肥料处理提高了 13.89%,这主要因为控释肥养分释放规律与向日葵各阶段养分需求基本一致,有助于氮素的吸收和营养物质向籽粒转运[21]。控释肥水氮耦合对向日葵产量的影响存在极显著水平,在控水灌溉与充分灌溉条件下,一定范围内(纯氮量小于等于 225 kg/hm^2)增施控释氮肥可以提高产量,继续增大施氮量,产量增加不明显甚至会出现降低的情况,符合报酬递减规律[22]。同一施氮水平,随灌水量增加,向日葵产量逐渐增加,充分灌溉处理产量高于控水灌溉 21.87%,提高灌水水平可以促进产量的形成[23-25]。而有研究表明,如果继续增大灌水量(灌水量超过 367.82 mm)会造成作物产量降低[26]。

水氮利用效率同样是衡量作物高产高效的主要指标,适宜的水氮配比能提高作物水氮利用效率。本研究结果表明,相同施氮水平,增加灌水可以将氮肥偏生产力和农学利用率提高 80.89% 和 21.53%,但会降低灌溉水利用效率,充分灌溉灌溉水生产效率相对于控水灌溉降低了 41.40%,这与邢英英等[27]研究结果一致。在相同灌水水平下,随着施氮量的增加,灌溉水生产效率也逐渐增加,氮肥的施用,可以促进作物的生长发育,提高水分利用效率,达到以肥调水的目的,但同时会降低氮肥偏生产力和农学利用率,这与 GOULDING 等[28]和 ZHUD 等[29]研究结果一致,但 SI 等[30]通过滴灌施肥试验发现增加灌水量和施氮量可以提高冬小麦水分利用效率,施氮量超过 240 kg/hm^{2}时,则会降低灌溉水生产效率,这可能是由于本试验采用畦灌方式进行灌溉,并施用控释肥料导致的。LYU 等[31]通过在稻田中施用不同类型的肥料进行研究,发现施用控释肥料相对于传统肥料可以提高氮肥利用效率 30.65% ~43.96%,这与本研究结果一致,相同水氮条件下,控释肥处理氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和灌溉水生产效率高于传统肥料处理 46.42%、13.61% 和 13.62%。因此,需要进一步了解控释肥在不同灌溉方式和水氮耦合条件下养分释放和迁移过程,实现养分供应与作物吸收相一致,更好地促进作物增产与养分高效利用。

经济效益不仅与产量相关,还与水氮投入相关。本研究通过建立水氮交互模型,发现水氮交互作用对经济效益有正效益,二者交互作用可以提高向日葵经济效益。随着施氮量的增加,向日葵经济效益先增大后减小,主要因为氮肥投入呈线性增长,而产量增长量随施氮量增加逐渐降低,说明过量施入氮肥会使经济投入增加,从而造成经济效益降低[32]。随着灌水量的增加,经济效益逐渐增加,而有研究表明经济效益在灌水量超过一定限度后会减小[33]。本研究中通过目标经济效益寻优,发现在施氮量为 236.88 ~282.6 kg/hm^2、灌水量为 346.5 ~361.8 mm 可以使经济效益最大化,但过多的灌水会降低水分利用效率,造成水分浪费,不符合节水灌溉理念,在施氮量为 174.33 ~ 258.12 kg/hm^2、灌水量为 291.06 ~351.9 mm 时,经济效益不会显著降低,但最多可以节水 707 m^3/hm^2,同时,氮肥的投入也相应减少,还可以提高肥料利用效率。

4 结论

(1)与传统肥料相比,控释肥可以有效提高作物产量 13.89%,提高水氮利用效率 13.61% ~46.42%。与控水灌溉相比,充分灌溉可以提高作物产量 21.87%,提高水氮利用效率 21.53% ~80.89%。

(2)产量随施氮量的增加逐渐增加,从低氮到中氮,2 年产量平均增加了 14.83%,从中氮到高氮增加了 3.86%。氮肥利用率随施氮量的增加逐渐减少,从低氮到高氮,氮肥农学利用率和偏生产力 2 年平均降低了 24.32% 和 48.89%。

(3)灌水量、施氮量、肥料类型、水氮交互和三因素交互作用对向日葵产量和水氮利用效率有显著影响。随灌水量和施氮量增加,产量呈增加趋势,但当施氮量超过 225 kg/hm^{2}后,产量增加缓慢。而水氮利用效率逐渐降低。

(4)以向日葵经济效益为目标建立了水氮二元二次回归方程,得出水氮均可以显著提高向日葵经济效益,灌水量作用大于施氮量,且水氮之间具有明显的交互作用。通过回归方程得到 2 年河套灌区控释肥施用条件下不同目标经济效益的最优水氮组合方案。

(5)根据河套灌区实际情况、控施肥施用水氮耦合对向日葵产量和水氮利用效率的影响,结合

水氮优化结果，本试验最优水氮配比为 W2N2（灌水量 360 mm，施氮量 225 kg/hm^2），该试验灌水量与获得较高经济效益优化组合中的灌水量接近，氮肥施用量在优化组合范围内，具有较高的经济效益和水氮利用效率，可以作为河套灌区控释肥施用水氮管理模式，在保证水氮高效利用及具有较高经济效益同时，还可以实现向日葵农田生产长期可持续发展。

参 考 文 献

[1] FENG Z Z, WANG X K, FENG Z Q. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management, 2005,71:131 – 143.

[2] 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.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013,19(2): 259 – 273. (in Chinese)

[3] ALBORNOZ F. Crop responses to nitrogen overfertilization: a review[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 205:79 – 83.

[4] 金容,李兰,郭萍,等. 控释氮肥比例对土壤氮含量和玉米氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报,2018, 32(6):214 – 221.
JIN Rong, LI Lan, GUO Ping, et al. Effect of the mixed ratios of controlled-release nitrogen fertilizer on soil nitrogen content and its uptake and utilization of maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(6): 214 – 221. (in Chinese)

[5] 石宁,李彦,张英鹏,等. 控释肥对小麦/玉米农田土壤硝态氮累积和迁移的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(20):3920 – 3927.
SHI Ning, LI Yan, ZHANG Yingpeng, et al. Effects of the controlled release fertilizer on nitrate accumulation and migration in the soil of wheat-maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018,51(20): 3920 – 3927. (in Chinese)

[6] 宋梓璇,李虎,李建政,等. 控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报,2018, 37(10):2342 – 2349.
SONG Zixuan, LI Hu, LI Jianzheng, et al. Effect of controlled-release fertilizer on the yield and soil ammonia volatilization of spring maize in Northeast China[J]. Journal of Agro-Environment Sciences, 2018,37(10): 2342 – 2349. (in Chinese)

[7] 靳存旺,段玉,李彬瑞,等. 向日葵施用缓释尿素的效果及氮磷钾施肥效应研究[J]. 内蒙古农业科技,2015,43(6):45 – 48.
JIN Cunwang, DUAN Yu, LI Binrui, et al. The study of controlled release urea (CRU) application effect and fertilizer efficiency of NPK[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2015,43(6): 45 – 48. (in Chinese)

[8] FAN X, LIU F. Effect of FMP coating urea on yield of winter wheat and N fertilizer use efficiency[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2004, 19(4): 66 – 69.

[9] 刘飞,张民,诸葛玉平,等. 马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(6):1351 – 1358.
LIU Fei, ZHANG Min, ZHUGE Yuping, et al. Effects of controlled-release fertilizer on vertical distribution of soil nutrients and nutrient use efficiencies under potato and maize relay cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(6): 1351 – 1358. (in Chinese)

[10] 宋娜,王凤新,杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业工程学报,2013, 29(13):98 – 105.
SONG Na, WANG Fengxin, YANG Chenfei, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(13): 98 – 105. (in Chinese)

[11] 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.
SONG Mingdan, LI Zhengpeng, FENG Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(2): 119 – 126. (in Chinese)

[12] 鲁耀泽,夏玉红,乌兰其其格, 等. 不同水肥模式对盐渍化农田向日葵生长及产量的影响[J]. 节水灌溉,2021(7):36 – 40,45.
LU Yaoze, XIA Yuhong, WU Lanqiqige, et al. Effect of different water and fertilizer modes on the growth and yield of sunflower in salinized farmland[J]. Water Saving Irrigation, 2021(7): 36 – 40,45. (in Chinese)

[13] 李梦月,胡田田,崔晓路, 等. 不同释放期控释肥和水氮用量对冬小麦产量的综合影响[J]. 农业工程学报,2020, 36(23):153 – 161.
LI Mengyue, HU Tiantian, CUI Xiaolu, et al. Comprehensive effects of irrigation water and nitrogen levels for controlled release fertilizer with different release periods on winter wheat yield[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(23): 153 – 161. (in Chinese)

[14] 王强,姜丽娜,潘建清, 等. 缓释氮肥一次性施肥对单季稻氮素吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(20): 3951 – 3960.
WANG Qiang, JIANG Li'na, PAN Jianqing, et al. Yield and nitrogen adsorption of single-cropping rice as influenced by one-off fertilization of slow-released nitrogen fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018,51(20): 3951 – 3960. (in Chinese)

[15] ALLEN R, PEREIRA L, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

[16] AZEEM B, KUSHAARI K Z, MAN Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. Journal of Controlled Release, 2014, 181(1):11 – 21.

[17] 张丽霞,杨永辉,尹钧,等. 水肥一体化对小麦干物质和氮素积累转运及产量的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(2): 275 – 282,319.
ZHANG Lixia, YANG Yonghui, YIN Jun, et al. Effects of drip fertigation on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen together with yield in wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(2): 275 – 282,319. (in Chinese)

[18] BALIGAR V C, DUNCAN R R, FAGERIA N K. Crops as enhancers of nutrient use[M]. Academic Press,1990:351 - 373.
[19] 高永祥,李若尘,张民,等. 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报,2021,58(6):1507 - 1519.
GAO Yongxiang, LI Ruochen, ZHANG Min, et al. Effects of straw returning combined with application of mixture of controlled-release urea and common urea on maize yield and soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica,2021,58(6):1507 - 1519. (in Chinese)
[20] 王文岩,董文旭,陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):135 - 141.
WANG Wenyan, DONG Wenxu, CHEN Suying, et al. Effect of continuously appling controlled-release fertilizers on nitrogen balance and utilization in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp. 2): 135 - 141. (in Chinese)
[21] 王振华,权丽双,郑旭荣, 等. 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(10):91 - 100.
WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(10): 91 - 100. (in Chinese)
[22] 孟凯,张兴义,隋跃宇, 等. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2005,13(2):119 - 121.
MENG Kai, ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, et al. The crop yields and water use efficiencies under different water and fertilizer conditions in the field of black soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(2): 119 - 121. (in Chinese)
[23] 周丽平,杨俐苹,白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(6):1449 - 1457.
ZHOU Liping, YANG Liping, BAI Youlu, et al. Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016,22(6): 1449 - 1457. (in Chinese)
[24] 王玉红,王长松,陈莉萍, 等. 树脂包膜尿素在水稻上的应用效果[J]. 江苏农业科学,2016,44(9):126 - 128.
[25] 刘红恩,张胜男,刘世亮,等. 腐植酸尿素对冬小麦产量、养分吸收利用和土壤养分的影响[J]. 西北农业学报,2018,27(7):944 - 952.
LIU Hongen, ZHANG Shengnan, LIU Shiliang, et al. Effects of humic urea on grain yield, nutrient uptake and utilization and soil nutrient of winter wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentals Sinica, 2018,27(7): 944 - 952. (in Chinese)
[26] 李仙岳,丁宗江,闫建文,等. 沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究[J]. 农业机械学报,2018,49(7):261 - 270.
LI Xianyue, DING Zongjiang, YAN Jianwen, et al. Interaction effect and model of water and nitrogen under degradable film mulching in drip irrigated sandy farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7): 261 - 270. (in Chinese)
[27] 邢英英,张富仓,吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊1):110 - 121.
XING Yingying, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Determination of optimal amount of irrigation and fertilizer under drip fertigated system based on tomato yield, quality, water and fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31 (Supp. 1): 110 - 121. (in Chinese)
[28] GOULDING K W T, JARVIS S C, WHITMORE A. Optimizing nutrient management for farm systems[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2008, 363(1491):667 - 680.
[29] ZHUD 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.
[30] SI Zhuanyun,ZAIN M,MEHMOOD F, et al. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2020,231: 106002.
[31] LYU Yanfeng,YANG Xiangdong,PAN Hengyu, et al. Impact of fertilization schemes with different ratios of urea to controlled release nitrogen fertilizer on environmental sustainability, nitrogen use efficiency and economic benefit of rice production: a study case from Southwest China[J]. Journal of Cleaner Production,2021,293: 126198.
[32] 丛鑫,张立志,徐征和,等. 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(3):315 - 324.
CONG Xin, ZHANG Lizhi, XU Zhenghe, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water and fertilizer use efficiency and economic benefits of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 315 - 324. (in Chinese)
[33] 刘明,张忠学,郑恩楠,等. 不同水氮管理模式下玉米光合特征和水氮利用效率试验研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12):27 - 34.
LIU Ming, ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, et al. Photosynthesis, water and nitrogen use efficiency of maize as impacted by different combinations of water and nitrogen applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(12): 27 - 34. (in Chinese)