

不同氮肥增效剂和水氮用量对冬小麦产量的影响

胡田田 崔晓路 李梦月 陆军胜 罗利华 陈绍民

(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: 为研究不同氮肥增效剂及水氮用量对冬小麦产量的影响,采用裂-裂区设计进行了田间试验。其中,主区设3个灌水水平(W1:30 mm、W2:60 mm和W3:90 mm),副区设3个施氮水平(N1:75 kg/hm²、N2:150 kg/hm²和N3:225 kg/hm²),每个主区下各设一个不施氮处理为对照(CK),副-副区为脲酶抑制剂(NBPT)和双效抑制剂(NBPT+DCD)两种氮肥增效剂处理,以传统施肥处理(CO)为对照。结果表明:灌水水平、施氮水平及氮肥增效剂类型均对冬小麦产量产生极显著影响($P<0.01$);随着灌水量/施氮量的增大,不同氮肥增效剂下冬小麦产量都呈现出先增加、后减小的趋势。NBPT和NBPT+DCD处理均在灌水量60 mm、施氮量75 kg/hm²时较CO的增产率达到最大,分别为20.23%和38.96%。回归分析和频率分析表明,NBPT处理在施氮量139~183 kg/hm²、灌水量47~67 mm的范围内,冬小麦可获得较高产量,在施氮量162 kg/hm²、灌水量为48 mm时,理论最高产量为7 409 kg/hm²;NBPT+DCD处理在施氮量149~185 kg/hm²、灌水量为50~65 mm时,冬小麦可获得较高产量,在施氮量为158 kg/hm²、灌水量51 mm时,理论最高产量为8 329 kg/hm²;CO处理获得最高产量时的灌水量、施氮量区间分别为49~63 mm、143~247 kg/hm²,相应产量为5 912~6 443 kg/hm²。综上,脲酶抑制剂和双效抑制剂均有明显的增产节肥效果,且以双效抑制剂效果更优。

关键词: 冬小麦; 氮肥增效剂; 水氮用量; 产量; 频率分析法

中图分类号: S365; S512.1⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0302-09 **OSID:** 

Effect of Different Nitrogen Fertilizer Synergists, Water and Nitrogen Amount on Winter Wheat Yield

HU Tiantian CUI Xiaolu LI Mengyue LU Junsheng LUO Lihua CHEN Shaomin

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

Abstract: In order to study the effects of different nitrogen fertilizer synergist and water and nitrogen amount on the yield of winter wheat, a field experiment was carried out by using a split zone design. The main area had three water levels (W1:30 mm, W2:60 mm and W3:90 mm), and subplot had three nitrogen levels (N1:75 kg/hm², N2:150 kg/hm² and N3:225 kg/hm²). A non-nitrogen control was set under each main area (CK), and deputy vice district was treated with two kinds of nitrogen fertilizer synergists with urease inhibitor (NBPT) and double inhibitors (NBPT+DCD), using traditional fertilization (CO) as the control. The results showed that the yield of winter wheat was significantly affected by irrigation level, nitrogen application level and type of nitrogen synergist ($P<0.01$). The yield of winter wheat under three nitrogen fertilizer synergist was increased at first, and then decreased with the increase of irrigation water/nitrogen application rate. Compared with CO, the yield of NBPT and NBPT+DCD reached the maximum at 60 mm of irrigation and 75 kg/hm² of nitrogen, which were 20.23% and 38.96%, respectively. Regression analysis and frequency analysis showed that NBPT could achieve higher yield of winter wheat in the range of 139~183 kg/hm² nitrogen application and 47~67 mm irrigation. The yield reached the theoretical maximum of 7 409 kg/hm² when nitrogen application was 162 kg/hm² and irrigation was 48 mm. Under the treatment of NBPT+DCD, the yield of winter wheat was higher when nitrogen was applied at 149~185 kg/hm² and irrigation water was 50~65 mm. Among them, the theoretical maximum yield was 8 329 kg/hm² when nitrogen was applied at 158 kg/hm²

收稿日期: 2020-07-29 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503124)

作者简介: 胡田田(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: hutiant@nwsuaf.edu.cn

and irrigation water was 51 mm. When the maximum yield was obtained by CO treatment, the nitrogen application interval was 143 ~ 247 kg/hm², and the irrigation interval was 49 ~ 63 mm, and the corresponding yield within this interval was 5 912 ~ 6 443 kg/hm². It can be seen that both NBPT and NBPT + DCD had obvious effect of increasing yield and saving fertilizer, and NBPT + DCD was better.

Key words: winter wheat; nitrogen fertilizer synergist; application amount of water and nitrogen; production; frequency analysis method

0 引言

氮肥投入是影响小麦产量稳定性的主导因素之一,目前农户已普遍形成了“要高产就必须多施肥”的施肥习惯^[1]。然而,作物产量并不随施氮量的增加而持续增加,并且过量施氮还会导致氮肥利用率和增产效应降低、氮素损失量增加、土壤酸化加剧,氮肥在土壤中的残留将导致环境污染等一系列问题^[2-4]。为此,研究人员提出了许多减氮措施,其中添加氮肥增效剂就是方法之一^[5-6]。氮肥增效剂能够对尿素的水解及硝化、土壤硝态氮的反硝化作用等进行抑制和调控,添加氮肥增效剂能在一定程度上减少氮肥损失、提高氮肥利用效率,同时还可减少施肥次数、降低成本^[7-9],在提高作物产量及保护环境等方面起到了积极的作用^[10]。

目前,常用的氮肥增效剂主要包括脲酶抑制剂、硝化抑制剂、铵稳定剂和双效抑制剂等^[11]。脲酶抑制剂通过抑制脲酶的活性减缓尿素的水解,从而使尿素更好地被作物利用^[12]。双效抑制剂是脲酶抑制剂与硝化抑制剂的配合施用,不仅能延缓尿素的水解,还能在一定程度上抑制尿素水解后的硝化过程^[9]。研究表明,脲酶抑制剂和硝化抑制剂的持续时间和抑制效果受土壤水分含量、土壤 pH 值以及灌水量和施氮量等因素的影响^[13-15]。李婷玉^[16]认为,灌溉体系对施用脲酶抑制剂的作物生产力影响很大,在适当的灌水量条件下,可以增产 8% 左右,但在雨养条件下只能增产 4% 左右。刘红江等^[17]研究表明,硝化抑制剂在较低施氮水平下可以提高不同生育期麦田土壤速效氮含量,但随着施氮量的继续增加,反而会降低土壤速效氮含量,从而降低作物产量。可见,氮肥增效剂需在合适的灌水施氮条件下才能更好地发挥作用。

目前,有关氮肥增效剂的研究主要集中在氮肥增效剂对土壤氮素转化的影响方面^[18-19],对作物产量方面的研究主要涉及氮肥增效剂或水肥用量等单一因素,关于氮肥增效剂类型与水肥用量综合作用的研究却鲜见报道。本文选用脲酶抑制剂、双效抑制剂两种常用的氮肥增效剂,以尿素传统施用为对照,设置不同的灌水、施氮水平,采用裂-裂区试验设计,定量研究不同氮肥增效剂下水氮用量对冬小麦

产量的影响,提出不同氮肥增效剂下适宜的水肥用量范围,以期氮肥增效剂的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 10 月—2019 年 6 月在陕西省咸阳市武功县海螭皇嘉农业示范园(34°21'N, 108°3'E,海拔 471 m)进行。该地区属于温带半湿润性季风气候,年平均气温 12.9℃,多年平均降雨量为 597 mm,无霜期 210 d。供试土壤为壤土,0 ~ 20 cm 土层的土壤容重为 1.36 g/cm³,土壤 pH 值为 8,有机质质量比 12.5 g/kg,全氮质量比 0.86 g/kg,速效磷质量比 32.3 mg/kg,速效钾质量比 174.5 mg/kg。以“西农 979”冬小麦为供试品种,于 2018 年 10 月 12 日播种,2019 年 6 月 2 日收获。冬小麦生育期内有效降雨量为 314 mm(图 1)。

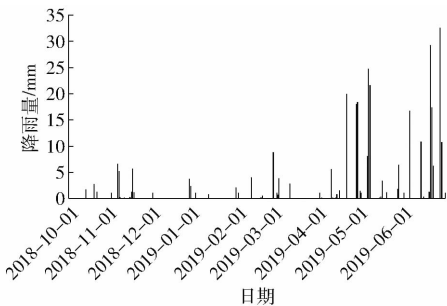


图 1 2018—2019 年冬小麦生育期内降雨量
Fig. 1 Rainfall during winter wheat growth period from 2018 to 2019

1.2 试验设计

试验采用裂-裂区设计,水分处理为主区,施氮处理为副区,氮肥增效剂类型为副-副区。主处理设低水 30 mm(W1)、中水 60 mm(W2)和高水 90 mm(W3)处理;副处理设低氮 75 kg/hm²(N1)、中氮 150 kg/hm²(N2)和高氮 225 kg/hm²(N3)处理;副-副处理为氮肥增效剂类型:脲酶抑制剂(NBPT)、双效抑制剂(NBPT + DCD),以传统施肥(尿素,基施、冬灌追肥、拔节追肥比例为 6:2:2,编号为 CO)处理为对照。另外在 3 个水分水平下各设 1 个不施氮处理(CK)。小区面积 36 m²(9 m × 4 m),共 30 个处理。脲酶抑制剂 + 尿素和双效抑制剂 + 尿素均一次

性基施;单施尿素的处理,氮肥的 60% 基施,20% 冬灌时施入,20% 拔节期施入。磷肥用过磷酸钙,施磷量为 105 kg/hm²;钾肥用氯化钾,施钾量为 45 kg/hm²。磷、钾肥一次性基施。

1.3 产量测定

在冬小麦成熟期各小区随机选取 6 个长势均匀的样方(1 m²)进行收获,人工脱粒后晒干,并对每个样方内的小麦籽粒进行称量,然后折算为以公顷为单位的产量。

1.4 数据分析与处理

1.4.1 频率分析

为了确定不同氮肥增效剂条件下灌水和氮肥施用的合适范围,以所有处理的平均产量为对照,计算各水氮水平下产量高于平均值的频率,从而确定其最佳灌水、施肥区间。按照 95% 置信区间确定最佳灌水、施肥区间(($\bar{x}_i - s_x t_{0.05(n_i-1)}$) ~ ($\bar{x}_i + s_x t_{0.05(n_i-1)}$)),其中 $t_{0.05(n_i-1)}$ 查表得到,其他各项计算公式为:

加权平均灌水量或施氮量 $\bar{x}_i$ 为

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_j} \sum_{j=0}^p u_j n_{ij} \quad (i = 1, 2, 3) \tag{1}$$

式中 n_{ij} ——不同灌水或施肥水平下高于平均产量发生的次数

u_j ——灌水或施氮水平

n_j ——总处理数

p ——产量高于 95% 置信区间的数量

均数标准差 s_x 为

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^p (u_j - \bar{x}_i)^2 n_{ij}}{(n_j - 1) n_j}} \tag{2}$$

1.4.2 统计分析

采用 DPS 7.0.5 软件分析数据,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。采用 Excel 2010 和 SigmaPlot 12.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 氮肥增效剂类型和水氮用量对冬小麦产量的影响

灌水水平、施氮水平、氮肥增效剂类型对冬小麦产量的影响都达到了极显著水平($P < 0.01$)。由表 1 可知,灌水处理以 W2 处理的冬小麦产量最高,分别比 W1 和 W3 水平高 15.40% 和 34.35%。施氮处理以 N2 处理下产量最高,分别比 N1 和 N3 处理增加 22.46% 和 8.77%。CO 处理的冬小麦产量最低,NBPT 处理和 NBPT + DCD 处理较 CO 处理分别增加 13.28% 和 26.21%。氮肥增效剂类型与灌水

水平的交互作用达到显著水平($P < 0.05$),施氮水平与灌水水平的交互效应达到极显著水平($P < 0.01$),氮肥增效剂类型与施氮水平的交互效应未达到显著水平($P > 0.05$)。氮肥增效剂类型、灌水水平和施氮水平三者的交互效应达到显著水平($P < 0.05$)。

表 1 试验因素对冬小麦产量的影响
Tab.1 Influence of experimental factors on winter wheat yield

因素		产量/(kg·hm ⁻²)
灌水水平	W1	6 521 ^b
	W2	7 252 ^a
	W3	5 398 ^c
施氮水平	N1	5 722 ^c
	N2	7 007 ^a
	N3	6 442 ^b
氮肥增效剂类型	CO	5 647 ^c
	NBPT + DCD	7 127 ^a
	NBPT	6 397 ^b
氮肥增效剂类型 × 灌水水平		*
氮肥增效剂类型 × 施氮水平		
施氮水平 × 灌水水平		**
氮肥增效剂类型 × 施氮水平 × 灌水水平		*

注: * 表示达到显著水平($P < 0.05$), ** 表示达到极显著水平($P < 0.01$),同列数据不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 水氮用量对不同氮肥增效剂增产效果的影响

由图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))可以看出,不同氮肥增效剂对冬小麦产量的影响因水氮用量而变化。在 W1 灌水水平下,NBPT 处理在 N2 施氮条件下的产量为 7 574 kg/hm²,NBPT + DCD 处理的产量为 8 204 kg/hm²,较 CO 处理增产 18.22% 和 28.05%。在 N1 水平下 NBPT 处理较 CO 处理增产 20.01%,NBPT + DCD 处理较 CO 处理增产 24.85%。在 N3 水平下,NBPT 处理和 NBPT + DCD 处理较 CO 处理分别增产 15.24% 和 25.30%(图 2a)。在 W2 灌水水平下,施氮量为 N1 水平时,NBPT 和 NBPT + DCD 处理较 CO 增产 20.23% 和 38.96%;施氮量为 N2 水平时,较 CO 处理增产 10.69% 和 26.96%。施氮量为 N3 水平时,NBPT 处理和 NBPT + DCD 处理较 CO 处理分别增产 17.76% 和 29.21%(图 2b)。在 W3 灌水水平下,施氮量为 N1、N2、N3 水平时,NBPT 和 NBPT + DCD 处理较相应的 CO 分别增产 4.78% 和 15.52%、6.32% 和 26.39%、4.45% 和 17.02%(图 2c)。可见,不论灌水与施氮水平高低,双效抑制剂均较脲酶抑制剂表现出更大的增产幅度。此外,在相同施氮水平下,NBPT 和 NBPT + DCD 处理较 CO 处理的增产率随着灌水量的增加都呈现出先

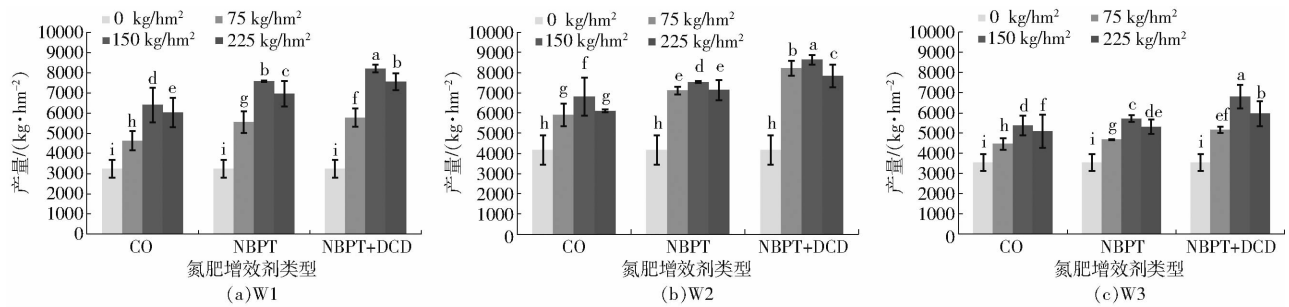


图 2 不同灌水水平下小麦产量随不同施氮量和氮肥增效剂的变化趋势

Fig. 2 Effect of nitrogen application rate on wheat yield under different nitrogen fertilizer synergists at different irrigation levels

增加后降低的趋势,在 W2 灌水水平下增产率达到最大(N2 施氮水平下 NBPT 处理除外)。

2.3 氮肥增效剂与灌水量的交互效应

由表 1 可知,氮肥增效剂类型与灌水水平的交互效应达到显著水平 ($P < 0.05$)。其交互效应值(与 CO 处理产量差值)见表 2。由表 2 可知,在 N1、N2、N3 施氮水平下,灌水量由 30 mm 增加到 60 mm 时,NBPT + DCD 处理与灌水量表现为正交互效应,继续增加灌水量至 90 mm,与灌水量表现为负交互效应。在 N1 和 N3 水平下,NBPT 处理表现出了相同规律,N2 水平下有所不同。总体上,与灌水量 30 mm 相比,增加灌水量至 60 mm,氮肥增效剂较 CO 处理增产效果增强,平均提高 118 kg/hm²,继续增加灌水量至 90 mm,氮肥增效剂较 CO 处理增产效果减弱,平均减少 274 kg/hm²。说明增加灌水量至 60 mm,可使氮肥增效剂的增产效果增强,继续增加灌水量至 90 mm,则使氮肥增效剂的增产效果反而降低,且以 NBPT + DCD 表现更为突出。

2.4 不同氮肥增效剂下冬小麦产量的水氮耦合效应

2.4.1 冬小麦水氮生产函数建立

采用回归分析法分别拟合 CO、NBPT 以及 NBPT + DCD 处理冬小麦产量与水氮用量之间的二

表 2 氮肥增效剂类型与灌水水平交互作用下产量的相对变化量

Tab. 2 Effects of interaction between nitrogen synergist type and irrigation level on yield

		kg/hm ²	
施氮水平	氮肥增效剂类型	W2	W3
N1	NBPT	135	- 356
	NBPT + DCD	576	- 228
N2	NBPT	- 220	- 194
	NBPT + DCD	19	- 189
N3	NBPT	78	- 347
	NBPT + DCD	122	- 330
平均		118	- 274

元二次水肥效应函数(Y 为冬小麦产量, N 、 W 分别为施氮量和灌水量)。由表 3 可知,拟合方程均达到显著水平($P < 0.05$),且符合报酬递减规律,说明该拟合函数能较好地表述不同氮肥增效剂下水氮用量对冬小麦产量的影响。不同增效剂相比,水氮生产函数的一次项、二次项系数不同,NBPT 和 NBPT + DCD 处理灌水量和施氮量的二次项系数绝对值均明显大于 CO 处理,导致 NBPT 和 NBPT + DCD 处理产量随灌水量和施氮量的变化幅度均大于 CO 处理。从回归方程还可以看出,水氮交互作用为负值,说明水氮配施不会一直增加冬小麦产量。

表 3 二元二次水氮效应模型

Tab. 3 Binary secondary water and nitrogen effect model

氮肥增效剂类型	水氮效应方程	P	F	R^2
CO	$Y = 2\,111.35 + 66.57W + 30.41N - 0.58W^2 - 0.076N^2 - 0.062WN$	0.000 4	22.27	0.940 8
NBPT	$Y = 1\,998.87 + 85.95W + 41.35N - 0.82W^2 - 0.12N^2 - 0.05WN$	0.000 7	18.18	0.928 5
NBPT + DCD	$Y = 1\,843.41 + 95.46W + 50.86N - 0.91W^2 - 0.16N^2 - 0.018WN$	0.001 1	15.75	0.918 4

2.4.2 水氮用量对冬小麦产量的影响

从图 3 可以看出,CO、NBPT 和 NBPT + DCD 处理下灌水量、施氮量对冬小麦产量的影响均呈抛物线形变化。方程中灌水量的一次项系数都大于施氮量,且均为正值,说明灌水量和施氮量对冬小麦产量提高的贡献为正效应,且灌水量的正效应大于施氮量(表 3)。表明当灌水量固定时,冬小麦产量随着

施氮量的增加呈先增加后下降趋势;当施氮量固定时,冬小麦产量随着灌水量的增加先增加而后也呈现出下降趋势,增幅相对于随施氮量的增幅加快。

由表 3 可知,在 N1 水平下,CO、NBPT、NBPT + DCD 处理冬小麦产量随灌水量的增加而增加,当灌水量分别增加到 53、50、52 mm 时冬小麦产量达到最大,分别为 5 617、6 485、7 191 kg/hm²,随后,随着

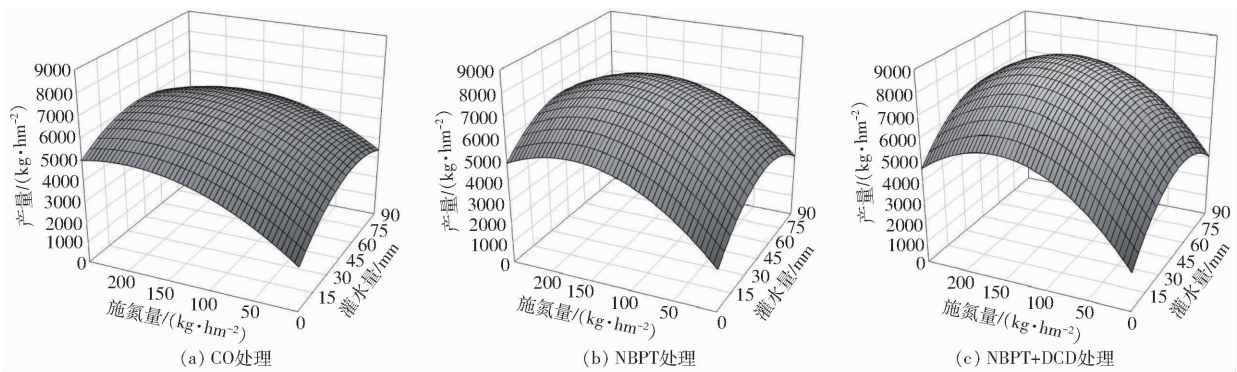


图3 不同氮肥增效剂下水氮用量交互作用对小麦产量影响的响应曲面

Fig.3 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on wheat yield

灌水量的增加冬小麦产量随之降低。在 N2 施氮水平下,CO、NBPT、NBPT + DCD 处理的最高产量分别为 6 377、7 378、8 236 kg/hm²,此时的灌水量分别为 49、48、51 mm。在 N3 施氮水平下,CO、NBPT、NBPT + DCD 处理在灌水量为 45、46、50 mm 时,产量达到理论最大值,分别为 6 300、6 929、7 482 kg/hm²。表明灌水量对冬小麦产量的影响随施氮量而变化。

在相同的灌水水平下,冬小麦产量也随着施氮量的增加呈现出先增加后降低的趋势。由表 3 可知,在 W1 灌水水平下,CO 处理在施氮量为 188 kg/hm² 时,产量达到最大值 6 268 kg/hm²,NBPT、NBPT + DCD 处理分别在施氮量为 166、157 kg/hm² 时产量达到最大值,分别为 7 178、7 845 kg/hm²。在 W2 灌水水平下,CO、NBPT、NBPT + DCD 处理产量达到理论最大值的施氮量分别为 176、160、156 kg/hm²,其理论最大产量分别为 6 361、7 268、8 164 kg/hm²。在 W3 灌水水平,CO、NBPT、NBPT + DCD 处理的最大产量分别为 5 433、5 921、6 852 kg/hm²,达到最大产量时的施氮量分别为 163、154、154 kg/hm²。可见,不同增效剂条件下施氮量对冬小麦产量的影响均随灌水量而变化。

2.4.3 理论最佳增产效果

对表 3 方程求偏导可得不同氮肥增效剂获得最高产量时的灌水量和施氮量(表 4)。可以看出,两种氮肥增效剂下冬小麦的理论最高产量都高于传统施肥模式。在施氮量为 180 kg/hm²、灌水量为 48 mm 时,CO 处理产量达到理论最大值 6 443 kg/hm²;此灌水施氮量下 NBPT 和 NBPT + DCD 处理理论上分别增产 14.20% 和 26.40%。将 NBPT 处理获得最高理论产量的施氮量 162 kg/hm²、灌水量 48 mm 代入 CO 处理水氮效应模型,计算可得 NBPT 处理较传统施肥理论增产 15.40%;同理,在施氮量同为 158 kg/hm²、灌水量同为 51 mm 时,双效抑制剂较 CO 处理理论增产 30.02%。表明相同水肥用量条件下,两种氮肥增效剂均可增加小麦产量,且 NBPT +

表 4 依据二元二次水肥效应函数的最高产量及其水氮用量

Tab.4 Maximum yield and its water and nitrogen application rate based on binary quadratic water and fertilizer effect function

氮肥增效剂类型	理论最高产量/ (kg·hm ⁻²)	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	灌水量/ mm
CO	6 443	180	48
NBPT	7 409	162	48
NBPT + DCD	8 329	158	51

DCD 处理的增产效果优于 NBPT 处理。

2.5 基于频率分析的最佳水肥用量区间及其增产效果

利用频率分析可得不同氮肥增效剂下冬小麦获得较高产量的水肥区间,如表 5 所示。由表 5 可以看出,CO 处理获得最高产量时的施氮量区间为 143 ~ 247 kg/hm²,灌水区间为 49 ~ 63 mm,相应产量为 5 912 ~ 6 443 kg/hm²。NBPT 处理获得最高产量的施氮区间为 139 ~ 183 kg/hm²,灌水区间为 47 ~ 67 mm,最高产量区间为 7 037 ~ 7 409 kg/hm²,在此灌水施氮区间下较 CO 处理可增产 9.10% ~ 26.69%。NBPT + DCD 处理获得最高产量时的施肥灌水区间为 149 ~ 185 kg/hm²、50 ~ 65 mm,相应产量为 7 923 ~ 8 329 kg/hm²,在此灌水施氮区间下较 CO 处理增产 22.97% ~ 40.88%。由此可知,与传统施肥相比,两种氮肥增效剂都有明显的增产效果,其中双效抑制剂的增产效果大于脲酶抑制剂,而且,两种氮肥增效剂下获得最高产量的氮肥用量小于传统施肥,其适宜灌水量相差不大。

3 讨论

本研究表明,在相同的灌水施氮条件下,添加 NBPT 和 NBPT + DCD 的处理较 CO 处理产量均有明显增加,这与人研究结果一致^[20-21]。原因可能在于,增效剂在尿素表面形成聚能网,聚能网中的高

表 5 以产量为目标的水肥用量区间

Tab. 5 Water and fertilizer consumption intervals targeted at yield

参数		CO 处理	NBPT 处理	NBPT + DCD 处理
施氮量/(kg·hm ⁻²)	加权平均数	200. 00	167. 05	160. 71
	标准差	70. 71	51. 40	49. 72
	均数标准差	28. 87	10. 96	13. 29
	最佳施肥区间	143 ~ 247	139 ~ 183	149 ~ 185
灌水量/mm	加权平均数	55. 71	57. 50	56. 67
	标准差	11. 34	15. 45	18. 03
	均数标准差	4. 29	4. 46	6. 01
	最佳灌水区间	49 ~ 63	47 ~ 67	50 ~ 65
最高产量区间/(kg·hm ⁻²)		5 912 ~ 6 443	7 037 ~ 7 409	7 923 ~ 8 329
较 CO 处理增产率/%			9. 10 ~ 26. 69	22. 97 ~ 40. 88

分子物质与肥料发生作用,溶解后能迅速张开形成网状结构,将施肥点周围土壤中的养分活化并富集,在植物根区形成充盈的养分库,有利于作物根系吸收,减少氮素养分流失,提高肥料利用率,增加作物产量^[22]。本研究还发现,尿素添加 NBPT + DCD 处理相对于 CO 处理的增产幅度较尿素添加 NBPT 处理更高。这可能是因为双效抑制剂具有脲酶抑制剂和硝化抑制剂的双重功效,脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合使用在作物的整个生长季起到了很大的作用。双效抑制剂不仅能延缓尿素的水解,还能在一定程度上抑制尿素水解后的硝化过程^[23],使土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量在较长时间内维持在较高水平,增加土壤中总有效态 N 含量,可以减少尿素 N 的损失,增加作物对尿素 N 的吸收量,从而增加冬小麦产量^[24]。

本研究发现,灌水量从 30 mm 增加至 60 mm,可使氮肥增效剂的增产效果增强,继续增加灌水量至 90 mm,则反而降低氮肥增效剂的增产效果,且以 NBPT + DCD 处理表现更为突出。原因可能在于,脲酶抑制剂和硝化抑制剂在土壤中的持续时间和抑制效果受土壤水分含量、土壤 pH 值以及灌水量等因素的影响^[11-13,23]。周旋等^[25]研究表明,尿素在 60% θ_F (θ_F 为田间持水率) 条件下水解时间大于 80% θ_F ,而脲酶抑制剂在 60% θ_F 条件下的有效作用时间也较 80% θ_F 延长,说明土壤含水量适当降低,尿素水解速度也减慢,继而酰胺态氮在土壤中存在的时间延长,脲酶抑制剂可以更好地发挥效果。也有研究表明,雨养条件较适量灌溉使脲酶抑制剂的增产幅度明显降低^[16]。由于双效抑制剂是脲酶抑制剂与硝化抑制剂的混合物,两者可能会受不同的环境因素影响^[26]。有研究表明,DCD 的水溶性很高,在土体中移动性也较强,在强降雨或者灌水量较多的情况下,容易与铵根分离,甚至造成 DCD 淋溶损失,从而对 DCD 的效果造成影响^[27]。综上,水分不足或水分过量都会影响氮肥增效剂效果的发挥,

合理灌溉才能使氮肥增效剂更好地发挥作用。

本研究表明,在 3 种灌水水平下,NBPT 和 NBPT + DCD 处理冬小麦产量随着施氮量的增加呈现出先增加后降低的趋势。李华伟等^[28]研究表明,在一定范围内施氮可以增加冬小麦地上部干物质质量,为提高冬小麦产量打下基础。但是过量施氮会降低开花期-灌浆期的作物生长速率^[29],而冬小麦产量的 60% ~ 90% 来源于开花后的光合产物,因此,过量施氮降低冬小麦开花后作物生长速率,进而抑制冬小麦产量的增长^[29-30]。本研究还表明,在相同施氮水平下,冬小麦产量随着灌水量的增加先增加后降低。这可能是由于灌水量对冬小麦产量及其构成因素^[31]影响显著,灌水量增加,冬小麦的千粒质量显著增加,从而使产量性状略有增加,但继续增加灌水量,反而会造成养分淋失、土壤通气性不良,影响根系呼吸作用,导致作物不能很好吸收养分,从而降低冬小麦产量^[32]。

本试验中,水氮用量之间存在负交互效应,即水氮配施并不会一直增加冬小麦产量。这可能与冬小麦不同生育阶段水氮供应的协调性及供应量有关。本试验条件下,冬小麦生育期降水主要集中在开花期以后,前期降水很少,拔节期之前累计有效降雨量仅为 56 mm(图 1)。有研究表明,轻度干旱条件下,增施氮肥可以缓解水分不足的影响,而在干旱相对严重时,过量施氮反而会加剧干旱程度,使作物不能很好地吸收水分,从而导致减产,即使生育后期降雨量增加,部分小麦抽穗,但来不及灌浆,属于无效穗数,并不能增加小麦产量^[33]。徐晓峰等^[34]研究表明,基施纯氮量 120 kg/hm²成穗率为 48. 95%,基施纯氮量 90 kg/hm²成穗率为 45. 16%,分别较基施纯氮量 180 kg/hm²成穗率增加 15. 80%、6. 84%。另一方面,水分过多会导致氮肥的淋溶损失,进而减少作物产量^[35]。张忠学等^[36]研究表明,植株氮肥利用效率在中等施氮水平下最高,但是灌水量过高容

易造成硝态氮的深层淋溶,而小麦根系 90% 分布在 100 cm 以上的土层中,硝态氮的深层淋溶不利于根系吸收利用,从而使籽粒产量降低^[37-38]。而且,高水高氮会造成作物群体后期严重倒伏,阻碍氮素转运,从而使产量降低^[39]。因此,合理的水氮用量才能对作物产量的提升有正交互效应。

4 结 论

(1) 在传统施肥及两种氮肥增效剂下,冬小麦产量均随着施氮量/灌水量的增加呈先增加、后减小的趋势,并且灌水水平与施氮水平及氮肥增效剂的交互作用对冬小麦产量均有显著影响。

(2) NBPT 和 NBPT + DCD 两种氮肥增效剂均有显著的增产效果,而且施氮量/灌水量对氮肥增效剂的增产效果有一定影响,NBPT 和 NBPT + DCD 处理均在灌水量 60 mm、施氮量 75 kg/hm² 时增产率最大,分别为 20.23% 和 38.96%。

(3) 建立了传统施肥、NBPT 和 NBPT + DCD 两种增效剂下冬小麦产量的水氮生产函数,并利用频率分析法确定了传统施肥和两种氮肥增效剂下获得最高产量的水肥用量区间,CO、NBPT、NBPT + DCD 处理获得最高产量的灌水、施氮区间分别为 49 ~ 63 mm 和 143 ~ 247 kg/hm²、47 ~ 67 mm 和 139 ~ 183 kg/hm²、50 ~ 65 mm 和 149 ~ 185 kg/hm²。

参 考 文 献

- [1] 同延安, EMTERYD Ove, 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. TONG Yan'an, EMTERYD Ove, ZHANG Shulan, et al. Evaluation of over-application of nitrogen fertilizer in China's Shaanxi Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1239 - 1244. (in Chinese)
- [2] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[C] // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009.
- [3] 李正鹏, 冯浩, 宋明丹. 关中平原冬小麦临界氮稀释曲线和氮营养指数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 177 - 183, 273. LI Zhengpeng, FENG Hao, SONG Mingdan. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index of winter wheat in Guanzhong Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 177 - 183, 273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151023&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.023. (in Chinese)
- [4] 石德杨, 张海艳, 董树亭. 土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 37 - 44. SHI Deyang, ZHANG Haiyan, DONG Shuting. Effects of nitrogen application on nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(1): 37 - 44. (in Chinese)
- [5] 王莉莉, 张兆冬, 王永露, 等. 氮肥与肥料增效剂配施对小麦产量、肥料利用率及经济效益的影响[J]. 现代农业科技, 2020(12): 8 - 9. WANG Lili, ZHANG Zhaodong, WANG Yonglu, et al. Effects of combined application of nitrogen fertilizer and fertilizer synergist on wheat yield, fertilizer utilization efficiency and economic benefits[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(12): 8 - 9. (in Chinese)
- [6] 陈可可, 张尚法, 杨梦飞, 等. 化肥减量配施有机肥对秋季茭白产量及品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2019(24): 30 - 33. CHEN Keke, ZHANG Shangfa, YANG Mengfei, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on yield and quality of *Zizania latifolia* in autumn[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2019(24): 30 - 33. (in Chinese)
- [7] 桂召贵, 雷金福, 王明秀, 等. 氮肥增效剂在小麦上的应用效果探索研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(17): 169 - 173. GUI Zhaogui, LEI Jinfu, WANG Mingxiu, et al. Study on the application effect of nitrogen fertilizer synergist on wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(17): 169 - 173. (in Chinese)
- [8] ABE K, OZAKI Y, HORST W J, et al. Removal of N and P from eutrophic pond water by using plant bed filter ditches planted with crops and flowers[J]. Plant and Soil Sciences, 2006, 11: 956 - 957.
- [9] GILL S L, SPURLOCK F C, GOH K S, et al. Vegetated ditches as a management practice in irrigated alfalfa[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2008, 144(1-3): 261 - 267.
- [10] DOUGLAS L A, BREMNER J M. A rapid method of evaluating different compounds as inhibitors of urease activity in soils-ScienceDirect[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1971, 3(4): 309 - 315.
- [11] 何威明. 氮肥增效剂作用效果及评价方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. HE Weiming. Study on the effects and evaluation methods of the nitrogen fertilizer synergist[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. (in Chinese)
- [12] 张艳艳, 张本强, 吴坤, 等. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮转化影响[J]. 江西农业, 2016(17): 27. ZHANG Yanyan, ZHANG Benqiang, WU Kun, et al. Effect of urease/nitrification inhibitor on urea nitrogen conversion[J]. Jiangxi Agriculture, 2016(17): 27. (in Chinese)
- [13] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 新型磷酸胺类脲酶抑制剂对不同质地土壤尿素转化的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 4003 - 4012. ZHOU Xuan, WU Lianghuan, DAI Feng. Influence of a new phosphoramidate urease inhibitor on urea-N transformation in different texture soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 4003 - 4012. (in Chinese)

[14] WANG Guoqiang, SUN Huanming, PENG Jing, et al. Advances in application of biological nitrification inhibitors [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(10): 2232 – 2237.

[15] 曹银珠,赵同科,刘树庆,等. 脲酶/硝化抑制剂双控过程中硝化抑制尿素分解效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 143 – 147.

CAO Yin Zhu, ZHAO Tongke, LIU Shuqing, et al. The effects of different ratios of dicyandiamide on influence of urease/nitrification inhibitor on urea hydrolysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 143 – 147. (in Chinese)

[16] 李婷玉. 增效氮肥综合效应及影响因素研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.

LI Tingyu. Evaluation of integrated effectiveness of enhance efficiency fertilizers and influencing factors[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[17] 刘红江,殷跃军,郭智,等. 硝化抑制剂对小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 443 – 449.

LIU Hongjiang, YIN Yuejun, GUO Zhi, et al. Effects of nitrification inhibitor on yield and nitrogen use efficiency of wheat [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 443 – 449. (in Chinese)

[18] 王长军,李凤霞,谭松伟,等. 硝化/脲酶抑制剂对宁夏灌淤土壤氮含量及其转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 285 – 289.

WANG Changjun, LI Fengxia. TAN Songwei, et al. Effects of nitrification/urease inhibitors on soil nitrogen content and transformation in irrigated and silted soil of Ningxia[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(21): 285 – 289. (in Chinese)

[19] TRENKEL M E. Characteristics and types of slow- and controlled-release fertilizers and nitrification and urease inhibitors[A]. Paris: International Fertilizer Industry Association(IFA), 2010: 56.

[20] 张文学,孙刚,何萍,等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1411 – 1419.

ZHANG Wenxue, SUN Gang, HE Ping, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(6): 1411 – 1419. (in Chinese)

[21] 孙海军,闵炬,施卫明,等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027 – 1033.

SUN Haijun, MIN Ju, SHI Weiming, et al. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field[J]. Soils, 2015, 47(6): 1027 – 1033. (in Chinese)

[22] 王丹阳,边文范,董晓霞,等. 氮肥增效剂用量对玉米产量和氮素利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(12): 53 – 57.

WANG Danyang, BIAN Wenfan, DONG Xiaoxia, et al. Effects of nitrogen fertilizer synergist amounts on yield and nitrogen use efficiency of maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(12): 53 – 57. (in Chinese)

[23] 倪秀菊,李玉中,徐春英,等. 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 145 – 149.

NI Xiuju, LI Yuzhong, XU Chunying, et al. Advance of research on urease inhibitor and nitrification inhibitor in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(12): 145 – 149. (in Chinese)

[24] 华建峰,蒋倩,施春健,等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2008(1): 94 – 99.

HUA Jianfeng, JIANG Qian, SHI Chunjian, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil urease activity, soil available N and the yield of spring wheat[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008(1): 94 – 99. (in Chinese)

[25] 周旋,吴良欢,戴锋. 土壤温度和含水量互作对抑制剂抑制氮素转化效果的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 106 – 115.

ZHOU Xuan, WU Lianghuan, DAI Feng. Inhibition effect of inhibitors on nitrogen transformation affected by interaction of soil temperature and water content[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 106 – 115. (in Chinese)

[26] SAGGAR S, SINGH J, GILTRAP D L, et al. Quantification of reductions in ammonia emissions from fertiliser urea and animal urine in grazed pastures with urease inhibitors for agriculture inventory: New Zealand as a case study[J]. Science of the Total Environment, 2013, 465(1): 136 – 146.

[27] ZERULLA W, BARTH T, DRESSEL J, et al. 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP)—a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture[J]. Biology & Fertility of Soils, 2001, 34(2): 79 – 84.

[28] 李华伟,陈昱利,嵯其翠,等. 施氮对冬小麦生长及产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(12): 119 – 127.

LI Huawei, CHEN Yuli, XIANG Qicui, et al. Simulation study on effects of nitrogen application on growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(12): 119 – 127. (in Chinese)

[29] 张永丽,李雁鸣,肖凯,等. 氮磷用量对杂种小麦 C6 – 38/Py85 – 1 群体生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1599 – 1603.

ZHANG Yongli, LI Yanming, XIAO Kai, et al. Effects of nitrogen and phosphorus application rate on population growth and grain yield of hybrid wheat C6 – 38/Py85 – 1[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(9): 1599 – 1603. (in Chinese)

[30] 赵风华,马军花,欧阳竹. 过量施氮对冬小麦生产力的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1075 – 1081.

ZHAO Fenghua, MA Junhua, OUYANG Zhu. Effects of excessive nitrogen supply on productivity of winter wheat[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(10): 1075 – 1081. (in Chinese)

[31] 章杰,胡田田,何琼,等. 灌水量及减氮模式对冬小麦产量及水氮利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 148 – 154.

ZHANG Jie, HU Tiantian, HE Qiong, et al. Effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer-reduction pattern on yield and utilization of water and nitrogen of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 148 – 154. (in Chinese)

[32] 姚德龙. 基于“3414”试验设计的夏玉米-冬小麦水肥效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.

- YAO Delong. Effect of water and fertilizer on maize - wheat rotation based on the method of "3414" [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [33] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 924 - 936.
- LUO Wenhe, SHI Zujiao, WANG Xumin, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on soil nitrate nitrogen distribution, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(6): 924 - 936. (in Chinese)
- [34] 徐晓峰, 石兆勇, 常会庆, 等. 基肥减量对冬小麦生长、产量构成和氮肥利用效率的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 81 - 87, 9.
- XU Xiaofeng, SHI Zhaoyong, CHANG Huiqing, et al. Effects of reduced base fertilizer rate on growth, yield components and nitrogen fertilizer use efficiencies of winter wheat[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 41(3): 81 - 87, 9. (in Chinese)
- [35] 翟丙年, 李生秀. 水氮配合对冬小麦产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 26 - 32.
- ZHAI Bingnian, LI Shengxiu. Effect of water and nitrogen cooperation on winter wheat yield and quality[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2003, 9(1): 26 - 32. (in Chinese)
- [36] 张忠学, 刘明, 齐智娟. 喷灌条件下水氮用量对玉米氮素吸收转运的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 299 - 308.
- ZHANG Zhongxue, LIU Ming, QI Zhijuan. Effect of water nitrogen dosage on nitrogen absorption and transformation of maize under sprinkler irrigation condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 299 - 308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190833&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.033. (in Chinese)
- [37] 张嫚, 周苏玫, 杨习文, 等. 减氮适墒对冬小麦土壤硝态氮分布和氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3885 - 3897.
- ZHANG Man, ZHOU Sumei, YANG Xiwen, et al. Effects of nitrogen-reducing and suitable soil moisture on nitrate nitrogen distribution in soil, nitrogen absorption and utilization of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(20): 3885 - 3897. (in Chinese)
- [38] 邱喜阳, 王晨阳, 王彦丽, 等. 施氮量对冬小麦根系生长分布及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1): 53 - 58.
- QIU Xiyang, WANG Chenyang, WANG Yanli, et al. Effects of nitrogen application rate on root system distribution and grain yield of winter wheat cultivars[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2012, 21(1): 53 - 58. (in Chinese)
- [39] 陈慧, 黄振江, 王冀川, 等. 水氮耦合对滴灌冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 44 - 56.
- CHEN Hui, HUANG Zhenjiang, WANG Jichuan, et al. Effect of water and nitrogen coupling on N absorption, translocation and yield of winter wheat under drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(1): 44 - 56. (in Chinese)

(上接第 292 页)

- [29] WALLS S, BINNS A D, LEVISON J, et al. Prediction of actual evapotranspiration by artificial neural network models using data from a bowen ratio energy balance station[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(6): 1 - 18.
- [30] SUN W, LI Z. Hourly PM_{2.5} concentration forecasting based on mode decomposition-recombination technique and ensemble learning approach in severe haze episodes of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121442.
- [31] ZHAI B, CHEN J. Development of a stacked ensemble model for forecasting and analyzing daily average PM_{2.5} concentrations in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 644 - 658.
- [32] 孙致学, 姜宝胜, 肖康, 等. 基于新型集成学习算法的基岩潜山油藏储层裂缝开度预测算法[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(3): 32 - 38.
- SUN Zhixue, JIANG Baosheng, XIAO Kang, et al. Prediction algorithm of fracture opening of bedrock buried hill reservoir based on a new integrated learning algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 32 - 38. (in Chinese)
- [33] 白桦, 鲁向晖, 杨筱筱, 等. 基于彭曼公式日均值时序分析的中国蒸发能力动态成因[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 235 - 244.
- BAI Hua, LU Xianghui, YANG Xiaoxiao, et al. Attribution analysis on changes in evaporation capacity based on mean diurnal time-series analysis of Penman equation in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 235 - 244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190126&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.026. (in Chinese)
- [34] 齐建东, 黄金泽, 贾昕. 基于 XGBoost - ANN 的城市绿地净碳交换模拟与特征响应[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 269 - 278.
- QI Jiandong, HUANG Jinze, JIA Xin. Simulation of NEE and characterization of urban green-land ecosystem responses to climatic controls based on XGBoost - ANN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 269 - 278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190531&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.031. (in Chinese)