

不同喷灌施氮频率下冬小麦产量和氮素利用研究

蔡东玉¹ 周丽丽¹ 顾涛² 严海军¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054)

摘要: 为了研究圆形喷灌机水肥一体化条件下不同施氮频率对冬小麦生长、产量、植株氮素利用及土壤硝态氮含量变化的影响, 试验设置4个施氮频率(拔节期1次, 拔节期和灌浆期2次, 返青期、拔节期和灌浆期3次, 返青期、拔节期、开花期和灌浆期4次施肥), 开展2年田间试验。试验结果表明: 施氮频率从1次增加至4次对冬小麦产量影响显著, 其中4次处理产量最高(分别为9 128.5、9 092.3 kg/hm²); 对不同生育阶段的生物量分配有显著影响, 同时冬小麦收获指数、蛋白质产量和氮肥偏生产力有显著提高; 此外0~40 cm 土层土壤的硝态氮含量在冬小麦生育期保持较高水平。综合来看, 建议冬小麦圆形喷灌机水肥一体作业时采取基肥和4次追氮的施肥管理方案。

关键词: 冬小麦; 产量; 氮素利用; 圆形喷灌机; 水肥一体化; 施氮频率

中图分类号: S275.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)06-0278-09

Yield and Nitrogen Utilization of Winter Wheat under Different Nitrogen Application Frequencies with Sprinkler Irrigation System

CAI Dongyu¹ ZHOU Lili¹ GU Tao² YAN Haijun¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China)

Abstract: In 2014—2015 and 2015—2016, a field experiment was conducted at Tongzhou Experimental Station of China Agricultural University, Beijing, to study the effects of nitrogen application frequencies on the yield and nitrogen utilization of winter wheat under fertigation with a center pivot system. The experiment set one time at jointing stage (T1), two times at jointing and filling stages (T2), three times at recovering, jointing and filling stages (T3), and four times at recovering, jointing, flowering and filling stages (T4), with consistency of irrigation and nitrogen rates during the whole growth period of winter wheat. The effects of nitrogen application frequencies on yield, ground biomass, plant nitrogen utilization, the grain protein content of winter wheat and the dynamic variation of soil nitrate content were evaluated. The two-year results showed that nitrogen application frequencies had a significant effect on the yield of winter wheat and the treatment T4 obtained the highest yield (9 128.5 kg/hm² and 9 092.3 kg/hm², respectively). No significant differences existed in total biomass of winter wheat between nitrogen application frequencies, while the distribution of biomass was affected significantly by nitrogen application frequencies in different growth periods. The treatment T4 greatly increased the harvest index, protein yield and nitrogen partial factor productivity of winter wheat. The soil nitrate content in depth of 0~40 cm exceeded the average value when nitrogen was applied with low rates and high frequency during the whole growth period of winter wheat. Comprehensively, the fertilizer management of adopting base fertilizer and nitrogen application of treatment T4 was suggested during the growth period of winter wheat under center pivot irrigation system.

Key words: winter wheat; yield; nitrogen utilization; center pivot; fertigation; nitrogen application frequency

收稿日期: 2017-12-27 修回日期: 2018-01-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201502)和国家自然科学基金项目(51621061)

作者简介: 蔡东玉(1990—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: cdongyu@126.com

通信作者: 严海军(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术与装备研究, E-mail: yanhj@cau.edu.cn

0 引言

华北地区是我国小麦主产区,提高该地区小麦产量对确保我国粮食安全具有战略意义。当前冬小麦栽培管理中为了追求高产,氮肥投入量居高不下,但氮肥的利用率只有30%~35%,甚至更低^[1]。普遍采用地面灌溉和过量施氮导致了氮素大量淋失,同时不合理的追肥时间和施肥方式也降低了该地区的氮素利用效率^[2]。因此,如何在保证华北地区冬小麦产量的前提下优化水氮管理,提高氮肥利用效率,实现资源的可持续利用是当前亟待解决的问题。水肥一体化技术具有节水、节肥、省工、环保等诸多优点,已成为现代农业生产中一项重要的综合管理技术措施^[3]。由于圆形喷灌机具有控制面积大、自动化程度高、操作方便等优点^[4-5]，“十二五”以来,我国圆形喷灌机发展应用面积逐渐加快,利用圆形喷灌机开展水肥一体化作业也得到了应用和发展^[6]。

近年来,国外在圆形喷灌机灌溉施肥对氮素利用的影响方面开展了很多研究工作。SPALDING等^[7]研究发现,圆形喷灌机水肥一体化可以显著减少土壤氮素淋失。GASCHO等^[8]认为圆形喷灌机水肥一体化技术为玉米叶片吸收氮肥创造了条件,提高了氮肥的吸收效率,从而促进玉米增产。国内在喷灌施肥一体化方面的研究主要集中在管道式喷灌系统上。李久生等^[9-11]研究了半固定式喷灌系统下喷灌施肥均匀性对冬小麦氮素吸收量、产量、土壤氮素空间分布的影响,结果表明喷灌均匀系数在62%~82%变化范围内,喷灌施肥均匀性对冬小麦氮素吸收量、产量以及土壤氮素空间分布无明显影响。刘海军等^[12-13]研究表明,喷灌条件下冬小麦的产量和水分利用效率明显高于地面灌溉,并且能够调节田间温度与湿度等气候条件。张英华等^[14]研究表明,在灌水总量一定的条件下,增加冬小麦生育期微喷次数,使得开花期后用水比例增加,延缓了叶片衰老,增加了花后干物质积累,提高了千粒质量和籽粒产量。近年来国内在圆形喷灌机水肥一体化技术方面也陆续开展了相关研究,严海军等^[15]研究表明,圆形喷灌机采用泵注式施肥装置进行喷灌施肥作业具有较高的喷灌施肥均匀性,可以满足作物施肥需求。综合来看,国内外学者主要在喷灌施肥均匀性、喷灌灌水量以及灌水频率对作物产量和水分利用效率等方面开展研究工作,但是关于喷灌水肥一体化条件下施肥制度对产量及氮肥利用效率的影响研究相对较少。

本文通过基于圆形喷灌机水肥一体化条件下不

同施氮频率对冬小麦产量、地上部分生物量、植株氮素利用及土壤硝态氮含量变化的影响研究,筛选冬小麦圆形喷灌机水肥一体化最优施氮方案,以期为华北地区冬小麦水肥管理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2014—2015年和2015—2016年在中国农业大学通州实验站(39°41′59″N、116°41′01″E)进行。试验区地处永定河、潮白河冲积平原,地势平坦,属温带大陆性半湿润季风气候,海拔291 m,年平均温度11.3℃,无霜期185 d,年平均降水量620 mm,主要分布在6—9月。土壤类型为砂壤土,耕层有机质质量比13 g/kg,全氮质量比1.06 g/kg,速效磷质量比19.1 mg/kg,速效钾质量比49.31 mg/kg,pH值7.9,土壤肥力中等。灌溉用井水,井深80 m,距试验地约200 m。

1.2 试验设计

试验供试小麦品种为农大211。2014—2015年和2015—2016年播种日期分别为2014年9月29日和2015年10月9日,播种量分别为240、300 kg/hm²,行距15 cm。试验所用圆形喷灌机由2跨(43.3 m和37.5 m)和悬臂(16.5 m)组成,机组长度97.3 m。配置美国Nelson公司的D3000型喷头,选用蓝色喷盘,喷头间距2.9~3.1 m,距地面约1.6 m,每个喷头安装压力调节器(Nelson公司,104 kPa)。喷灌机入机流量为24.8 m³/h,入机工作压力0.15 MPa。施肥设备采用泵注式施肥装置^[16],肥料桶体积为2 000 L。试验地形状为90°的扇形,总面积约0.74 hm²。以圆形喷灌机中心支轴为圆心均分成4个试验处理,而且每个处理在机组第2跨和悬臂控制区域内又设置3个6 m×10 m的试验小区,因此共12个小区(4个处理×3次重复)。为避免不同试验处理之间的影响,最靠近中心支轴的试验小区与相邻处理试验小区之间的最短周向距离大于该位置对应喷头的喷洒直径。试验布置如图1所示。

2年试验均采用基肥和追肥的施肥方案。2014—2015年冬小麦总施氮量333 kg/hm²,其中基肥采用复合肥(总养分大于等于48%,N:P₂O₅:K₂O为28:15:5),施氮量126 kg/hm²;2015—2016年总施氮量315 kg/hm²,其中基肥采用磷酸二铵(总养分大于等于64%,N:P₂O₅:K₂O为18:46:0),施氮量为108 kg/hm²。2年追肥肥料均选用尿素(N大于等于46%),施氮量均为207 kg/hm²,采用圆形喷灌机水肥一体化进行追施。追肥处理按冬小麦不同生育期

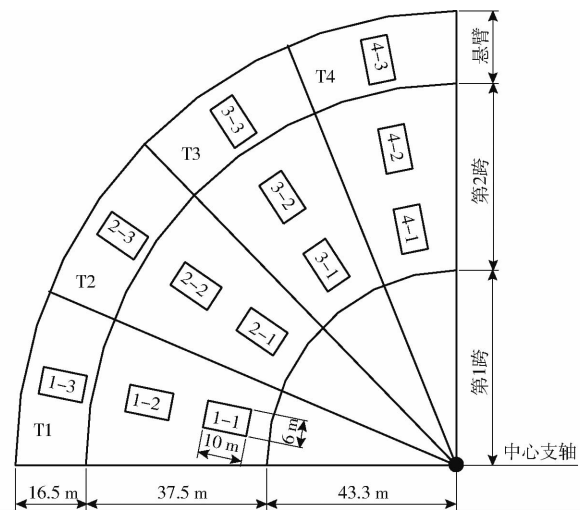


图1 试验布置示意图
Fig. 1 Experimental plot

表1 冬小麦不同生育期的施氮处理

Tab. 1 Nitrogen amount applied for winter wheat at different growth stages

年份	处理	追肥次数	施氮量/(kg·hm ⁻²)					总量
			基肥	返青期	拔节期	开花期	灌浆期	
2014—2015	T1	1	126		207.0			333
	T2	2	126		138.0		69.0	333
	T3	3	126	69	103.5		34.5	333
	T4	4	126	69	69.0	34.5	34.5	333
2015—2016	T1	1	108		207.0			315
	T2	2	108		138.0		69.0	315
	T3	3	108	69	103.5		34.5	315
	T4	4	108	69	69.0	34.5	34.5	315

($P>0.05$),因此本试验不考虑喷灌均匀性对试验小区布置的影响。

1.3.2 气象数据采集

试验区安装美国 HOBO 公司的自动气象站,可实时监测气象数据,包括降水量、风速、风向、气温、相对湿度、太阳辐射等。冬小麦生长季 2014—2015 年降水量 156.1 mm,2015—2016 年降水量 170.7 mm。由图 2 可以看出,冬小麦生育期内降水总体分布不均匀,生长前期降水量较少,而后期 4—6 月降水较多。

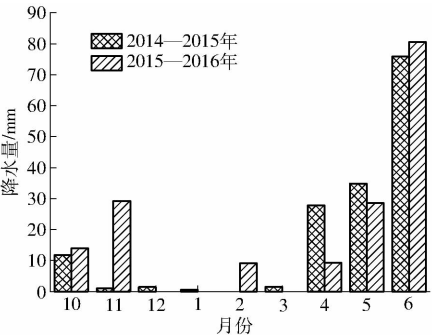


图2 冬小麦生育期内降水量

Fig. 2 Precipitation in winter wheat growing seasons

设置 4 个施氮频率处理,即在拔节期施氮(T1),在拔节期和灌浆期施氮(T2),在返青期、拔节期和灌浆期施氮(T3),在返青期、拔节期、开花期和灌浆期施氮(T4)。具体试验处理如表 1 所示。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 喷灌均匀性测定

圆形喷灌机水量分布均匀性是决定喷灌施肥均匀与否的前提条件。2014 年参照 GB/T 19797—2012^[17]在冬小麦苗期对圆形喷灌机进行了水量分布均匀性试验。试验设置了 2 种机组运行速度,对应百分率计时器设定值为 20%、40%,试验期间风速为 0.1~1.8 m/s,平均温度为 9.3℃,平均湿度为 19%。测得喷灌机第 2 跨和悬臂喷灌区域内的平均喷灌均匀系数分别为 81% 和 77%,且无显著差异

1.3.3 作物指标测定与计算

(1)群体生物量积累测定:在拔节期、开花期和成熟期测定群体生物量,每个小区取代表性的 2 行×50 cm 样段,按叶片、茎鞘、穗等分器官处理。在 105℃杀青 30 min,80℃干燥至恒质量后称量(精确至 0.1 g),计算阶段干物质积累量和分配比例。

(2)植株全氮(%)含量及籽粒蛋白质含量的测定:从生物量样品中随机选取有代表性的 10 株小麦植株在分器官测定生物量后,将材料磨碎制成待测样品保存。采用半微量凯氏定氮法测定氮含量,计算冬小麦群体氮积累量与氮素利用指标。籽粒蛋白质含量按籽粒含氮量乘以 5.7 折算^[18]。

(3)冬小麦产量及产量构成因素的测定:在冬小麦成熟期测产,采用对角线取样法。测产小区尺寸为 1 m×1 m,脱粒风干,调查穗数、穗粒数和千粒质量,籽粒质量含水率计为 13%,最后折算成单位面积籽粒产量(kg/hm²)。

(4)土壤硝态氮含量测定:分别在返青期、拔节期、开花期和灌浆期灌水或灌水施肥后 7~10 d 采用土钻取土,取土深度为 80 cm,每 20 cm 为一层;采用紫外分光光度计测定土壤硝态氮含量^[19],每个处

理的测定结果为 3 个重复的平均值。

(5)氮素利用相关指标计算:籽粒蛋白质产量为籽粒产量和籽粒蛋白质含量的乘积;植株地上部分含氮量为成熟期地上各部分器官生物量的总和与各部分器官含氮量的乘积;氮素利用效率为籽粒产量和成熟期地上部分总吸氮量的比值;氮素收获指数为籽粒吸氮量和植株总吸氮量的比值;氮肥偏生产力为籽粒产量和总施氮量的比值。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2013 进行记录和整理,采用 SPSS 20.0 统计软件进行方差分析和 Origin 9.1 绘图软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 冬小麦产量和产量构成

由表 2 可知,2014—2015 年冬小麦籽粒产量随施氮频率的增加而增大,T4 处理产量显著高于 T2 和 T1 处理($P<0.05$),T3 处理产量显著高于 T1 处理($P<0.05$);T4 与 T3 处理、T3 与 T2 处理、T2 与 T1 处理产量差异不显著($P>0.05$)。从产量构成

因素来看,随着施氮频率的增加,各处理穗数差异不显著($P>0.05$);穗粒数随着施氮频率的增加而增大,其中 T4 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P<0.05$),但与 T3 处理无显著差异($P>0.05$)。T4 处理的千粒质量高于其余处理,但各处理之间差异不显著($P>0.05$)。在收获指数方面,T4 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P<0.05$),但和 T3 处理差异不显著($P>0.05$),其余处理之间差异也不显著($P>0.05$)。

2015—2016 年,冬小麦生育期内施氮频率从 1 次增加到 2 次、3 次和 4 次,籽粒产量依次增大,其中 T4 处理产量显著高于 T2 和 T1 处理($P<0.05$),其余处理之间差异不显著($P>0.05$)。在产量构成方面,T4 处理穗数显著高于 T3 处理($P<0.05$),其余处理之间差异不显著($P>0.05$);T1 到 T4 处理穗粒数差异不显著($P>0.05$);在千粒质量方面,T3 处理最大,显著高于 T2 和 T1 处理($P<0.05$),其余处理差异不显著($P>0.05$)。在收获指数方面,T4 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P<0.05$),但 T4 和 T3 处理,T3、T2 和 T1 处理之间差异不显著($P>0.05$)。

表 2 不同处理下冬小麦产量及产量构成
Tab.2 Grain yield and yield components of winter wheat under different treatments

年份	处理	穗数/(万穗·hm ⁻²)	穗粒数	千粒质量/g	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	收获指数
2014—2015	T1	559.6 ^a	35.1 ^b	43.1 ^a	7 689.1 ^c	0.38 ^b
	T2	563.1 ^a	36.1 ^b	43.9 ^a	8 092.5 ^{bc}	0.38 ^b
	T3	580.2 ^a	37.1 ^{ab}	43.9 ^a	8 594.7 ^{ab}	0.41 ^{ab}
	T4	580.6 ^a	38.7 ^a	45.1 ^a	9 128.5 ^a	0.43 ^a
2015—2016	T1	750.5 ^{ab}	29.4 ^a	35.2 ^b	7 746.7 ^b	0.39 ^b
	T2	754.3 ^{ab}	29.3 ^a	35.2 ^b	7 748.1 ^b	0.38 ^b
	T3	710.7 ^b	30.2 ^a	39.7 ^a	8 446.1 ^{ab}	0.42 ^{ab}
	T4	810.7 ^a	30.1 ^a	37.3 ^{ab}	9 092.3 ^a	0.45 ^a

注:不同小写字母表示不同施氮频率处理差异显著($P<0.05$),下同。

综合 2 年不同施氮频率处理下的产量数据(表 2)可以看出:冬小麦产量随着施氮频率的增加而增大,2 年处理都以 T4 处理产量最高,表明生育期 4 次追肥能显著提高冬小麦产量,但是产量构成因素在 2 年内有所不同。2014—2015 年冬小麦生长初期基本苗(270 万株/hm²)偏低,导致后期有效穗数均值(564 万穗/hm²)低于 2015—2016 年;该生长季施氮频率增加主要促进了穗粒数和千粒质量增加。2015—2016 年冬小麦初期基本苗(330 万株/hm²)比 2014—2015 年高 22%,成熟期有效穗数均值(748 万穗/hm²)比 2014—2015 年高 32.7%;但该年穗粒数和千粒质量均值分别比 2014—2015 年低 23.6%和 19.6%,因此穗数对产量的贡献高于 2014—2015 年。2 年试验中 T4 处理收获指数最

大,表明 4 次追肥有利于提高生物量向产量的转化比例。

2.2 冬小麦地上部分生物量积累和分配

从冬小麦成熟期群体地上部分生物量来看(表 3),2014—2015 年在喷灌水肥一体化条件下,总生物量随施氮频率的增加呈现增大的趋势,但所有处理总生物量差异不显著($P>0.05$)。从阶段生物量积累和分配来看,在出苗-拔节的 T4 处理显著高于 T3、T2 和 T1 处理($P<0.05$),T3 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P<0.05$),表明 T4 和 T3 处理在返青期追肥显著提高了该阶段生物量。在拔节-开花所有处理都进行了追肥,该阶段 T1、T2、T3、T4 处理的施氮量依次减少,相应生物量积累值随之降低,其中 T4 处理显著低于其余处理($P<0.05$),表明该

阶段生物量的积累值随着试验处理施氮量的增加而增大。进入开花-成熟,T2 处理生物量积累量最大,其次是 T4 处理,且 T2 显著高于 T3、T1 处理($P < 0.05$),表明适当增加灌浆期追氮比例有助于提高该阶段生物量。

2015—2016 年试验结果表明,在喷灌水肥一体化条件下施氮频率从 1 次增加至 4 次对总生物量影响也不显著($P > 0.05$)。从阶段生物量积累和分配来看,出苗-拔节 T4 和 T3 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P < 0.05$),T4 和 T3 处理差异不显著($P > 0.05$),表明 T4 和 T3 处理在返青期追肥显著提高

了该阶段的生物量。在拔节-开花所有处理都进行了追肥,该阶段 T1、T2、T3、T4 处理的施氮量依次减少,相应生物量积累值随之降低,其中 T4 处理显著低于 T1 处理($P < 0.05$)。进入开花-成熟,T2 处理生物量值显著高于 T3 和 T1 处理($P < 0.05$),T3 处理也显著高于 T1 处理($P < 0.05$),表明适当增加灌浆期追氮量的比例有助于提高该阶段生物量。从 2 年生物量分配比例的试验结果可以看出:相比于其他处理,T4 处理生物量的积累值在整个生育期的分配要更加均匀。可见施氮频率的增加使得冬小麦生物量在各阶段的分配更合理。

表 3 不同处理下冬小麦生物量在各生长阶段的积累与分配

Tab.3 Biomass accumulation and distribution during different growing periods under different treatments								
年份	处理	出苗-拔节		拔节-开花		开花-成熟		总生物量/ (kg·hm ⁻²)
		生物量/(kg·hm ⁻²)	比例/%	生物量/(kg·hm ⁻²)	比例/%	生物量/(kg·hm ⁻²)	比例/%	
2014—2015	T1	3 827.0 ^c	18.7	9 850.1 ^a	48.3	6 721.8 ^c	33.0	20 398.9 ^a
	T2	3 995.0 ^c	18.9	9 700.8 ^a	45.9	7 449.8 ^a	35.2	21 145.6 ^a
	T3	4 511.2 ^b	21.3	9 570.7 ^a	45.1	7 121.9 ^b	33.6	21 203.8 ^a
	T4	4 898.4 ^a	23.1	9 051.7 ^b	42.6	7 278.7 ^{ab}	34.3	21 228.8 ^a
2015—2016	T1	3 513.9 ^c	17.9	9 290.7 ^a	47.3	6 820.2 ^c	34.8	19 624.8 ^a
	T2	3 909.2 ^b	19.3	8 968.0 ^{ab}	44.4	7 339.2 ^a	36.3	20 216.4 ^a
	T3	4 478.6 ^a	22.2	8 661.3 ^{ab}	42.8	7 081.0 ^b	35.0	20 220.9 ^a
	T4	4 722.2 ^a	23.2	8 444.8 ^b	41.6	7 155.5 ^{ab}	35.2	20 322.6 ^a

2.3 冬小麦籽粒蛋白质含量和籽粒蛋白质产量

2 年试验结果表明(图 3):2014—2015 年随着施氮频率的增加冬小麦籽粒蛋白质含量也相应增加,各处理差异不显著($P > 0.05$);2015—2016 年冬小麦籽粒蛋白质含量的变化趋势与 2014—2015 年一致,但 T4 处理显著高于 T3、T2 和 T1 处理($P < 0.05$),T3 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P < 0.05$),T2 和 T1 处理差异不显著($P > 0.05$)。综合来看,2 年中 T4 处理籽粒蛋白质含量最高,2014—2015 年达到 14.9%,比 T3、T2、T1 处理分别高 4.2%、8.0%、8.8%;2015—2016 年 T4 处理的籽粒蛋白质质量分数为 15.0%,比 T3、T2、T1 处理分别高

5.6%、13.6%、14.5%。可见,生育期 4 次追肥处理有利于提高冬小麦籽粒蛋白质含量。

由图 4 可知,2 年中冬小麦籽粒蛋白质产量均随着施氮频率的增加而增大。2014—2015 年 T4 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P < 0.05$),其余处理之间差异不显著($P > 0.05$);2015—2016 年 T4 处理显著高于 T3、T2 和 T1 处理,T3 处理显著高于 T2 和 T1 处理($P < 0.05$),T2 和 T1 处理差异不显著($P > 0.05$)。可见,随着冬小麦生育期追肥次数从 1 次增加至 4 次,籽粒蛋白质产量显著提高($P < 0.05$)。

2.4 冬小麦氮素利用效率

由表 4 可知,2014—2015 年植株地上部分含氮

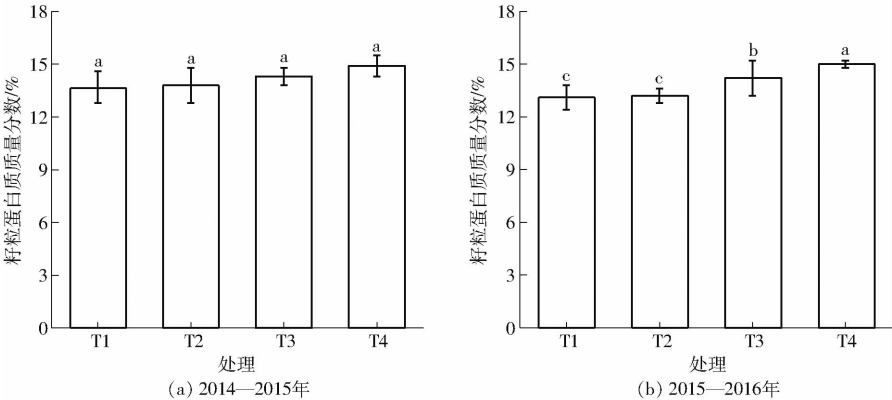


图 3 不同处理下冬小麦籽粒蛋白质质量分数

Fig.3 Grain protein content of winter wheat under different treatments

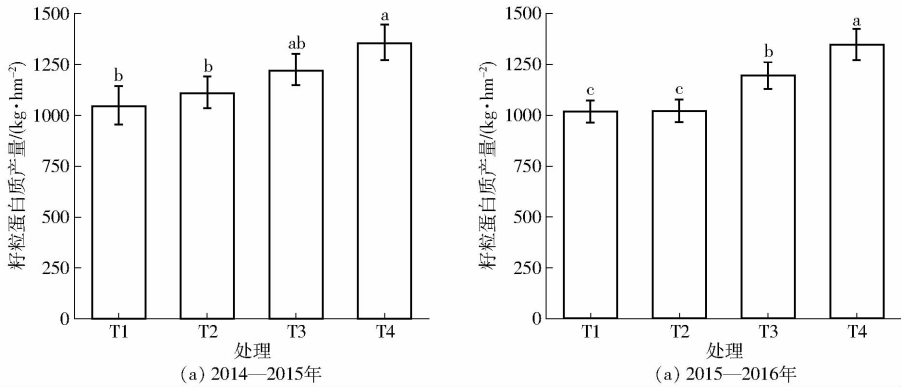


图4 不同处理下冬小麦籽粒蛋白质产量

Fig.4 Grain protein yield of winter wheat under different treatments

量随着施氮频率的增加而增大,其中T4处理显著高于T2和T1处理($P < 0.05$),T3处理显著高于T1处理($P < 0.05$),T2和T1处理差异不显著($P > 0.05$);2015—2016年T4处理显著高于T2和T1处理($P < 0.05$),其余处理间差异不显著($P > 0.05$)。2年试验表明,冬小麦植株地上部分含氮量随施氮频率的增加而增大,2014—2015年T4处理比T3、T2、T1处理分别增加2.6%、11.9%、18.4%,2015—2016年T4处理比T3、T2、T1处理分别增加4.5%、10.2%、11.4%。氮素利用效率在2年试验中所有处理间差异均不显著($P > 0.05$),2014—2015年T1和T4处理相等,并且高于T2、T3处理;2015—2016年T4处理高于T3、T2、T1处理。氮素收获指数在2014—2015年所有处理差异均不显著($P > 0.05$),其中T4处理比T3、T2、T1处理分别高8.8%、8.8%、12.7%;2015—2016年T4处理显著高于T2和T1处理($P < 0.05$),其中T4处理比T3、T2、T1处理分别高10.0%、22.2%、20.3%。氮肥偏生产力方面,在2014—2015年试验中T4和T3处理差异不显著($P > 0.05$),T4显著高于T2、T1处理($P < 0.05$);在2015—2016年试验中T4处理显著高于T2和T1处理($P < 0.05$),其余处理间差异不显著

($P > 0.05$)。2年试验表明,施氮频率从1次增加至4次能显著提高氮肥偏生产力。

2.5 冬小麦生长季土壤硝态氮含量变化

土壤硝态氮能够直接被植物吸收利用,其含量是反映农田土壤养分水平的重要指标之一^[20-21]。图5表示2015—2016年各处理分别在返青期、拔节期、开花期、灌浆期灌水施肥7~10d后土壤0~80cm土层硝态氮含量,其中各生育期灌水施肥后取样期间最大降雨发生在灌浆期,降雨量为14.5mm。由图5a可知,返青期T4和T3处理施肥后0~20cm平均含量分别为60.1、60.0mg/kg,显著高于T2和T1处理($P < 0.05$);在0~40cm土层T4、T3硝态氮含量高于T2处理但不显著($P > 0.05$),显著高于T1处理($P < 0.05$);在40~60cm处各处理硝态氮含量均降低,但T4和T3处理含量依然高于T2和T1处理,在60~80cm土层处各处理硝态氮含量基本相同。表明返青期T4和T3追施氮肥提高了0~40cm土层硝态氮含量。

冬小麦进入拔节期对土壤硝态氮的吸收量增加,由图5b可知拔节期施肥后,土壤0~20cm和20~40cm处硝态氮含量平均值比上个生育期有所增加。其中在0~20cm处T1处理硝态氮含量显著高于T3、T4处理($P < 0.05$),T2处理也显著高于T4处理;20~40cm土壤硝态氮含量随着T1、T2、T3、T4处理施氮量的减少也相应降低;进入40~60cm和60~80cm土层硝态氮含量和上个生育期相比变化不大。拔节期所有处理都灌水45mm,但从60~80cm土壤硝态氮含量可以看出该阶段灌水并未引起硝态氮向下渗漏,这与李艳等^[22]认为冬小麦生长季喷灌灌水量小于等于40mm条件下硝态氮的运移深度最大为80cm,且有利于防止硝态氮渗漏和提高作物对氮素吸收利用能力的研究结果相近。

开花期土壤硝态氮含量变化如图5c所示,所有处理在0~60cm土层硝态氮含量相比于上个生育

表4 不同处理下氮素利用效率

Tab.4 Nitrogen utilization efficiency under different treatments

年份	处理	植株地上部	氮素利用	氮素收获 指数	氮肥偏 生产力/ (kg·kg ⁻¹)
		分含氮量/ (kg·hm ⁻²)	效率/ (kg·kg ⁻¹)		
2014—2015	T1	324.4 ^c	23.8 ^a	0.55 ^a	23.1 ^c
	T2	343.1 ^{bc}	23.6 ^a	0.57 ^a	24.3 ^{bc}
	T3	374.5 ^{ab}	23.0 ^a	0.57 ^a	25.8 ^{ab}
	T4	384.1 ^a	23.8 ^a	0.62 ^a	27.4 ^a
2015—2016	T1	279.2 ^b	27.7 ^a	0.64 ^b	24.6 ^b
	T2	282.2 ^b	27.5 ^a	0.63 ^b	24.6 ^b
	T3	297.7 ^{ab}	28.4 ^a	0.70 ^{ab}	26.8 ^{ab}
	T4	311.1 ^a	29.2 ^a	0.77 ^a	28.9 ^a

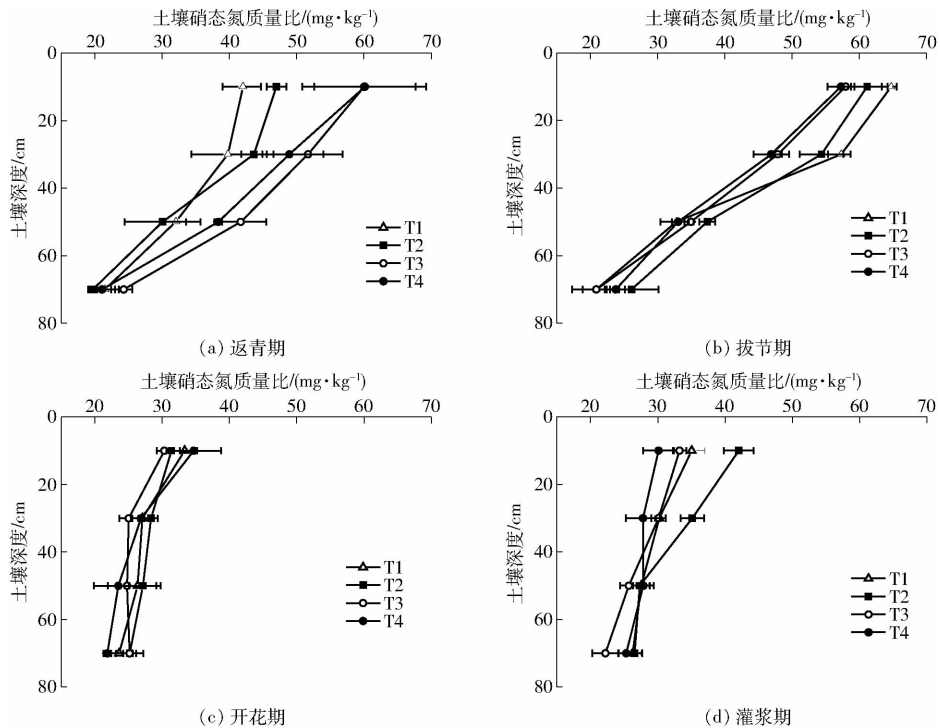


图 5 2015—2016 年不同处理下生育期内土壤 0 ~ 80 cm 硝态氮含量变化

Fig. 5 Dynamics of soil nitrate content in depth of 0 ~ 80 cm under different treatments in 2015—2016

期有所减少,其中 0 ~ 40 cm 土层硝态氮下降最明显,T4 处理 0 ~ 20 cm 硝态氮含量高于其他处理,但各处理之间差异不显著 ($P > 0.05$),表明 T4 处理在开花期追施少量氮肥补充了该阶段 0 ~ 20 cm 土壤硝态氮。由图 5d 可知,相比于开花期,T2 处理 0 ~ 40 cm 土壤硝态氮增加,其余处理在灌浆期土壤硝态氮含量变化不大,在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层,T2 硝态氮含量显著高于 T4、T3、T1 处理 ($P < 0.05$),在 40 ~ 80 cm 处所有处理差异不显著 ($P > 0.05$),表明灌浆期追施少量氮肥能够有助于提高土壤 0 ~ 40 cm 硝态氮含量,促进冬小麦生长后期从土壤耕层吸收氮素。可见,少量多次追施氮肥能使土壤硝态氮更多地分布在土壤表层,促进了根系对氮素的吸收。

3 讨论

合理的水肥管理方案既可以确保小麦产量稳定,同时也能提高水肥利用率^[1]。水肥一体化技术是精准农业的重要措施之一,能够提高水肥利用率、作物的产量和品质^[3, 23]。本研究在 2 个生长季采用的灌溉定额分别为 187.5 mm 和 135 mm,远低于传统灌溉的灌水量。高鹭等^[24]研究表明,喷灌灌水定额较小,灌水大部分集中于 0 ~ 60 cm 土层,有利于冬小麦根系对水分吸收利用,对提高灌溉水分利用效率具有积极作用。在施肥方面,本研究中 2 个生长季的基肥施氮量分别为 126、108 kg/hm²,追氮

量均为 207 kg/hm²,这与薛彬等^[25]在高产田下采用的喷灌追氮量接近。尹飞虎等^[26]研究发现,滴灌随水施肥技术与常规灌溉施肥技术相比,可以提高肥料利用率。姚素梅等^[27]研究表明,和传统灌溉相比喷灌灌水能提高小麦籽粒产量和蛋白质含量。本研究中 T1 处理 2 年的产量值都高于当地传统管理方式下小麦的产量^[28],这可能与本文采用圆形喷灌机水肥一体化技术有关。增加冬小麦生育期施肥频率使得冬小麦在中后生育期氮肥追施分配比例增大。有研究表明^[29]氮肥后移可延长冬小麦后期的叶片功能期,从而提高籽粒产量,同时在较高施氮水平下,分次施用氮肥的产量显著高于一次性基施方式。周艳等^[30]研究发现,在总施肥量一定的情况下,滴灌春小麦的产量随施肥频率的增加而增加,但超过一定的施肥频率后,滴灌春小麦的产量随着施肥频率的增加而下降。本研究施氮频率从 1 次增加至 4 次,改变了传统一次施入基肥或者在拔节期一次追施氮肥的方式,使得在开花期、灌浆期也有了水氮供应,结果表明产量随着施氮频率的增加而增大,其中 2014—2015 年产量从 7 689.1 kg/hm² 增加至 9 128.5 kg/hm²;2015—2016 年产量从 7 746.7 kg/hm² 增加至 9 092.3 kg/hm²,这与上述研究结论一致。本研究发现,在提高产量的途径中,增加冬小麦生育期施氮频率在基本苗偏低的情况下能促进穗粒数和千粒质量的增加,以弥补有效穗数的不足,进而保证产量;在基本苗满足高产田的要求时,增加生育期施

氮频率可以保证成熟期的有效穗数,从而确保产量的稳定。

有关追氮时期和基追比例对冬小麦产量和品质的研究说法不一。赵俊晔等^[31]、潘庆民等^[32]研究发现,开花至成熟阶段是小麦氮素吸收分配的关键时期,开花后营养器官氮素的转移对籽粒氮素积累有较大贡献,增加开花后的吸氮量不仅有利于提高小麦的籽粒产量并可改善籽粒品质。王晓英等^[33]、石书兵等^[34]研究发现,不同追氮时期的追肥比例对蛋白组分的调控效应不同,对小麦产量和品质的影响不同,不同品种在不同地区种植,其施氮时期后移的效应存在一定的差异。上述研究中灌溉都采用了传统畦灌或管道式喷灌方式,而追肥采用人工撒施或机具条施方式,尚未见到喷灌水肥一体化条件下冬小麦不同生育期追肥对产量、品质等的研究报道。本研究是在基于圆形喷灌机水肥一体化条件下,试验得到生育期4次追肥籽粒蛋白质含量最高,表明将冬小麦传统生产中拔节期一次追施的氮肥分配到返青、拔节、开花和灌浆4个生育期,其中返青和拔节期追肥量占全部追肥量的2/3,开花和灌浆期占

1/3,并通过喷灌水肥一体化方式施入田间可以提高冬小麦籽粒产量和蛋白质含量。

4 结论

(1)2年试验中T4处理产量最高(分别为9 128.5、9 092.3 kg/hm²),表明采用圆形喷灌机水肥一体化技术在冬小麦生育期保持灌溉施肥量一致的前提下,在基本苗偏少时增加施氮频率可以提高穗粒数和千粒质量,而在基本苗较高时有利于提高穗数和千粒质量,进而提高籽粒产量。

(2)2年试验表明,在圆形喷灌机水肥一体化条件下,增加施氮频率对冬小麦总生物量的影响不显著,但可以显著影响生物量在不同生育期的分配比例、籽粒蛋白质含量、氮素收获指数和氮肥偏生产力。

(3)采用圆形喷灌机水肥一体化技术对冬小麦进行少量多次追施氮肥,发现0~40 cm土层的土壤硝态氮含量在冬小麦各生育阶段要高于同期40~80 cm土层硝态氮含量,降低了硝态氮向土壤深层的渗漏,有利于根系吸收氮肥,从而提高冬小麦对氮素的利用效率。

参 考 文 献

- 1 王志敏,王璞,李绪厚,等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报,2006,8(5):38-44.
WANG Zhimin, WANG Pu, LI Xuhou, et al. Principle and technology of water-saving, fertilizer-saving, high yielding and simple cultivation in winter wheat[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2006, 8(5): 38-44. (in Chinese)
- 2 王秀斌. 优化施氮下冬小麦/夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
WANG Xiubin. Nitrogen cycling and balance in winter wheat-summer corn rotation system under optimized nitrogen management [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese)
- 3 张承林,邓兰生. 水肥一体化技术[M]. 北京:中国农业出版社,2013.
- 4 SMITH A, NORTH S. Planning and managing center pivot and linear move irrigation in the Southern Riverina[C]//Queensland: Cooperative Research Center for Irrigation Futures, 2009.
- 5 MATTHEW D R, GENE S, JAMES W H, et al. Nitrogen fertilization on center pivot sprinkler irrigated rice[J]. Crop Management, 2011, 10(1): 1094-1106.
- 6 严海军,王志鹏,马开. 圆形喷灌机注肥泵的设计与试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(5):456-460.
YAN Haijun, WANG Zhipeng, MA Kai. Design and experiment on fertigation plunger pump in center pivot irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014,32(5):456-460. (in Chinese)
- 7 SPALDING R F, WATTS D G, SCHEPERS J S, et al. Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(4): 1184-1194.
- 8 GASCHO G J, HOOK J E. Development of a fertigation program for sprinkler-irrigated corn[J]. Journal of Production Agriculture, 1991, 4(3): 306-312.
- 9 李久生,李蓓,宿梅双,等. 冬小麦氮素吸收及产量对喷灌施肥均匀性的响应[J]. 中国农业科学,2005,38(8): 1600-1607.
LI Jiusheng, LI Bei, SU Meishuang, et al. Responses of nitrogen uptake and yield of winter wheat to nonuniformity of sprinkler fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1600-1607. (in Chinese)
- 10 李久生,饶敏杰,李蓓. 喷灌施肥灌溉均匀性对土壤硝态氮空间分布影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3):51-55.
LI Jiusheng, RAO Minjie, LI Bei. Spatial distribution of nitrate in soil as affected by uniformity of sprinkler fertigation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 51-55. (in Chinese)
- 11 李久生,饶敏杰. 喷灌施肥均匀性对冬小麦产量影响的田间试验评估[J]. 农业工程学报,2000,16(6):38-42.
LI Jiusheng, RAO Minjie. Field evaluation of yield response of winter wheat to uniformity of sprinkler applied fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 38-42. (in Chinese)
- 12 刘海军,康跃虎,刘士平. 喷灌对冬小麦生长环境的调节及其对水分利用效率影响的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6):46-51.
LIU Haijun, KANG Yuehu, LIU Shiping. Regulation of field environmental condition by sprinkler irrigation and its effect on water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 46-51. (in Chinese)
- 13 刘海军,康跃虎,刘士平. 喷灌对农田小气候的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(4):103-107.
LIU Haijun, KANG Yuehu, LIU Shiping. Effects of sprinkler irrigation on the field microclimate[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(4): 103-107. (in Chinese)

- 14 张英华,张琪,徐学欣,等. 适宜微喷灌灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报,2016,32(5):88-95.
ZHANG Yinghua, ZHANG Qi, XU Xuexin, et al. Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 88-95. (in Chinese)
- 15 严海军,马静,王志鹏. 圆形喷灌机泵注式施肥装置设计与田间试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):100-106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150914&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.014.
YAN Haijun, MA Jing, WANG Zhipeng. Design and field experiment on fertilizer injection device in center pivot irrigation System[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 100-106. (in Chinese)
- 16 王志鹏. 圆形喷灌机泵注入式施肥装置的设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
WANG Zhipeng. Design and experimental research on pump injection fertigation device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 17 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业灌溉设备 中心支轴式和平移式喷灌机水量分布均匀度的测定:GB/T 19797—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- 18 贾殿勇. 不同灌溉模式对冬小麦籽粒产量、水分利用效率和氮素利用效率的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2013.
JIA Dianyong. Effects of different irrigation regimes on grain yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency of winter wheat[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 19 宋歌,孙波,教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. 土壤学报,2007,44(2):288-293.
SONG Ge, SUN Bo, JIAO Jianying. Comparison between ultraviolet spectrophotometry and other methods in determination of soil nitrate-N[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 288-293. (in Chinese)
- 20 杨新泉,冯锋,宋长青,等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(3):373-376.
YANG Xinquan, FENG Feng, SONG Changqing, et al. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroeco systems[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 373-376. (in Chinese)
- 21 张树兰,同延安,梁东丽,等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响[J]. 土壤学报,2004,41(2):270-277.
ZHANG Shulan, TONG Yan'an, LIANG Dongli, et al. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 270-277. (in Chinese)
- 22 李艳,张睿昊,刘海军,等. 优化喷灌水量下不同施氮量对土壤氮素累积和作物产量的影响[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(2):214-220.
LI Yan, ZHANG Ruihao, LIU Haijun, et al. Effect of application rate of nitrogen on nitrate distribution and accumulation in soil profile and their effects on crop yield in winter wheat-summer maize rotation system[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2013, 49(2): 214-220. (in Chinese)
- 23 TANASKOVIC V. The influence of drip fertigation on water use efficiency in tomato crop production[J]. Agriculturae Conspectus Scientificus, 2011, 76(1): 57-63.
- 24 高鹭,陈素英,胡春胜. 喷灌条件下冬小麦的水肥利用特征研究[J]. 灌溉排水学报,2005,24(5):25-28.
GAO Lu, CHEN Suying, HU Chunsheng. Study on consumption of water and fertilizer of winter wheat under sprinkling irrigation condition[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(5): 25-28. (in Chinese)
- 25 薛彬,李雪,严海军. 圆形喷灌机条件下不同灌水施肥量对冬小麦产量的影响[J]. 节水灌溉,2016,38(8):33-37.
XUE Bin, LI Xue, YAN Haijun. Effects of different irrigation and fertilization amount on winter wheat yield under center pivot irrigation system[J]. Water Saving Irrigation, 2016, 38(8): 33-37. (in Chinese)
- 26 尹飞虎,曾胜和,刘瑜,等. 滴灌春麦水肥一体化肥效试验研究[J]. 新疆农业科学,2011,48(12):2299-2303.
YIN Feihu, ZENG Shenghe, LIU Yu, et al. Study on water and fertilizer coupling of drip irrigation spring wheat[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(12): 2299-2303. (in Chinese)
- 27 姚素梅,康跃虎,吕国华,等. 喷灌与地面灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆过程特性分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):13-17.
YAO Sumei, KANG Yuehu, LÜ Guohua, et al. Analysis on grain filling characteristics of winter wheat under sprinkler irrigation and surface irrigation conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 13-17. (in Chinese)
- 28 王俊英,周吉红,叶彩华,等. 北京小麦高产指标化栽培技术[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2014.
- 29 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京:中国农业出版社,1996.
- 30 周艳,李明思,蓝明菊,等. 施肥频率对滴灌春小麦生长和产量的影响试验研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(4):72-75.
ZHOU Yan, LI Mingsi, LAN Mingju, et al. Effect of the frequency of fertilizer application on the grain yield and growth of spring wheat under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(4): 72-75. (in Chinese)
- 31 赵俊晔,于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. 作物学报,2006,32(4):484-490.
ZHAO Junye, YU Zhenwen. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition[J]. Acta Agronomic Sinica, 2006, 32(4): 484-490. (in Chinese)
- 32 潘庆民,于振文,王月福,等. 公顷产9000 kg小麦氮素吸收分配的研究[J]. 作物学报,1999,25(5):540-547.
PAN Qingmin, YU Zhenwen, WANG Yuefu, et al. Studies on uptake and distribution of nitrogen in wheat at the level of 9000 kg per hectare[J]. Acta Agronomic Sinica, 1999, 25(5): 540-547. (in Chinese)
- 33 王晓英,贺明荣. 追氮时期和基追比例对强筋小麦产量和品质的调控效应[J]. 麦类作物学报,2013,33(4):711-715.
WANG Xiaoying, HE Mingrong. Regulatory effect of topdressing stage and ratio of base and topdressing of nitrogen fertilizer on grain yield and quality of strong gluten winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(4): 711-715. (in Chinese)
- 34 石书兵,马林,石庆华,等. 不同施氮时期对冬小麦子粒蛋白质组分及其动态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(4):456-460.
SHI Shubing, MA Lin, SHI Qinghua, et al. Effect of nitrogen application timing on protein constitutes and its dynamic change in wheat grain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 456-460. (in Chinese)