

冬小麦根系发育特征及其与分蘖成穗的相关性

谢松鑫,贾晓雯,周苏玫,杨健,滕政凯,段剑钊,胡乃月,贺德先,杨习文

(河南农业大学农学院/国家小麦工程技术研究中心/省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室/河南粮食作物协同创新中心,河南郑州 450046)

摘要:为了解冬小麦根系特征与分蘖成穗的相关性,设置3个施氮水平(0、120和240 kg·hm⁻²),以冬小麦大穗型品种武农981、郑麦618、濮麦116和多穗型品种西农529、郑麦16、郑麦22为材料,研究冬小麦不同生育时期0~40 cm土层中根系形态性状,0~20 cm根系活力及茎蘖数的动态变化。结果表明,随小麦生育进程的推进,根干重密度、根表面积密度、根长密度、单株次生根数和根系活力均呈先升后降趋势,根系活力峰值出现在拔节期,其余指标峰值出现在开花期。随着最大单株次生根数的增加,根系活力提高了68.56~109.60 μg·g⁻¹·h⁻¹;根干重密度、根长密度和根表面积密度在0~20 cm土层中分别提高了48.67~170.14 g·m⁻³、0.78~1.04 m·m⁻³和4.77~7.76 m²·m⁻³,在20~40 cm土层中分别提高了17.96~65.93 g·m⁻³、0.13~0.18 m·m⁻³和0.96~1.55 m²·m⁻³;最大茎蘖数和分蘖成穗数分别提高了385.60万~816.34万·hm⁻²和51.65万~84.65万·hm⁻²,而分蘖成穗率则降低了3.68~3.86个百分点。不同时期的单株次生根数、根系活力、根干重密度、根长密度、根表面积密度以及最大茎蘖数和单位面积成穗数均随施氮量增加而增加,但分蘖成穗率随施氮量的增加而降低,处理间差异显著;大穗型品种的根系活力、根干重密度、根长密度和根表面积密度显著高于多穗型品种,但次生根数、最大茎蘖数和单位面积成穗数均显著低于多穗型品种。经相关性分析,单株次生根数、根系活力、根干重密度、根长密度和根表面积密度与最大茎蘖数均呈显著或极显著正相关,单株次生根数与单位面积成穗数呈显著正相关,而根系活力、根干重密度、根长密度和根表面积密度与单位面积成穗数均呈弱正相关或不相关;单株次生根数、根系活力、根干重密度、根长密度和根表面积密度与分蘖成穗率均呈显著或极显著负相关。这说明,冬小麦单株次生根数增加以及根系活力和根系形态数量性状提高有利于最大茎蘖数和单位面积分蘖成穗数的增加,但降低了分蘖成穗率。

关键词:最大茎蘖数;分蘖成穗率;根系形态数量性状;根系活性

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)08-1109-12

Development Characteristics of Root System and Its Correlation with Tillering and Panicle Formation in Wheat (*Triticum aestivum* L.)

XIE Songxin, JIA Xiaowen, ZHOU Sumei, YANG Jian, TENG Zhengkai,

DUAN Jianzhao, HU Naiyue, HE Dexian, YANG Xiwen

(College of Agronomy of Henan Agricultural University/National Engineering Research Center for Wheat/Co-Construction State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science/Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: In this study, the characteristics of wheat root development and their relationship with ears formation were investigated, and the correlation between root characteristics and panicle formation was clarified, so as to provide reference for coordinating root and panicle development. Three nitrogen application levels (0, 120, and 240 kg·hm⁻²) were set up to study the dynamic changes of root morphological and quantitative traits in 0–40 cm soil layers, root vigor in 0–20 cm soil layers and tiller number of wheat at different growth stages using the big-ear type varieties Wunong 981, Zhengmai

收稿日期:2024-12-04 修回日期:2025-03-12

基金项目:国家重点研发计划“主要作物丰产增效科技创新工程”重点专项(22YFD2300802);河南省科技攻关项目(242102111099、242102111084)

第一作者 E-mail: xsx175533@stu.henau.edu.cn(谢松鑫)

通讯作者 E-mail: Hny@henau.edu.cn(胡乃月); hed@henau.edu.cn(贺德先); yangxiwen@henau.edu.cn(杨习文)

618, and Pumai 116 and the multi-ear type varieties Xinong 529, Zhengmai 16, and Zhengmai 22 as materials. The results showed that the root dry weight density, root surface area density, root length density and nodal root per plant increased first and then decreased. The peak value was reached at anthesis stage, and the root vigor showed the same trend, but the peak value was at jointing stage. With the increase of the maximum number of nodal roots per plant, the root vigor increased by $68.56-109.60 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ in 0–20 cm soil layer. The root dry weight density, root length density and root surface area density were increased by $48.67-170.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $0.78-1.04 \text{ m} \cdot \text{m}^{-3}$ and $4.77-7.76 \text{ m} \cdot \text{m}^{-3}$ in 20–40 cm soil layer, respectively. They were increased by $17.96-65.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $0.13-0.18 \text{ m} \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.96-1.55 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The maximum number of tillers and panicle number of tillers were increased by $385.60 \times 10^4 - 816.34 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ and $51.65 \times 10^4 - 84.65 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$, while the ears formation ratio decreased by 3.68–3.86 percentage points. The number of nodal roots per plant, root vigor, root dry weight density, root length density, root surface area density, maximum tiller number and the ear per unit soil area all increased with the increase of nitrogen application rate, but the ear-bearing tiller percentage decreased with the increase of nitrogen application rate, and the difference between treatments reached a significant level. The root vigor, root dry weight density, root length density and root surface area density of big-ear cultivars were higher than those of multi-ear cultivar, but the number of nodal roots, the maximum number of tillers and ear per unit soil area were lower than those of multi-ear cultivar, with significant differences. Correlation analysis showed that the number of nodal roots per plant, root vigor, root dry weight density, root length density and root surface area density were significantly positively correlated with the maximum number of tillers; the number of nodal roots per plant was significantly positively correlated with ears number per unit area, while the root vigor, root dry weight density, root length density and root surface area density were weakly positively or not correlated with ears number per unit area. The number of nodal roots per plant, root vigor, root dry weight density, root length density, and root surface area density had significant negative correlation with ears formation ratio. In conclusion, the increase of nodal root number per plant, root vigor and root morphological and quantitative traits is conducive to the increase of the maximum number of tillers and ears number per unit area, but is reduces the ear-bearing tiller percentage.

Keywords: Maximum tillers; Earbearing tiller percentage; Root morphological and quantitative traits; Root vigor

小麦分蘖是其重要的生物学特性之一,促进分蘖成穗是小麦高产栽培的重要内容^[1]。小麦分蘖能力由基因型和环境因子共同决定^[2-3],而分蘖成穗的关键时期是拔节期至开花期^[4],分蘖成穗过程涉及到幼穗和小花分化、茎节伸长和分蘖消亡等环节^[5-7],成穗的数量和质量是多重因素综合作用的结果^[8]。因此,开展小麦分蘖成穗的研究对于小麦高产栽培体系的构建具有重要的理论意义。

根系是作物生长发育的重要器官之一,不仅具有吸收水分和养分的功能,而且可通过感知土壤理化信息变化,为植株适应环境提供信号^[9-12]。小麦根系生长发育与地上部干物质积累、群体构建、植株衰老、产量形成等密切相关^[13]。根长密

度、根体积比、根表面积、根平均直径、次生根数等是小麦重要的根系形态学性状,根系活力、活跃吸收面积是冬小麦重要的根系质量性状,这些性状能够反映根系吸收水分和养分的能力^[14-15]。目前有关小麦分蘖力和分蘖成穗与根系发育的研究相对薄弱,仅涉及到根蘖的同伸关系^[13],针对小麦分蘖成穗与根系不同形态数量性状、生理性状相关性的研究尚未见报道。

在品种类型上,小麦大穗型品种的穗粒数和千粒重较高,但分蘖及其成穗能力较弱,而多穗型品种的分蘖及其成穗能力较强,分蘖成穗率较高,但穗粒数和千粒重较低^[16-17]。在生产实践中,通过合理的氮肥运筹等措施能够显著提高小麦的最

大茎蘖数和分蘖成穗数,并促进根群构建和生长,提高根系形态数量性状和根系活力^[18-19]。基于此,本研究以分蘖能力和分蘖成穗率存在差异的不同穗型品种为材料,通过设置不同施氮水平调节小麦地上和根系生长发育特征,系统分析冬小麦分蘖发育及其成穗与根系性状的关系,以期小麦高产高效栽培和新品种选育提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2022—2024 年在河南农业大学科教园区原阳基地进行(35°06′57″N, 113°93′99″E)。试验地前茬为大豆,播前耕层土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量在 2022—2023 年度分别为 16.20 g·kg⁻¹、0.71 g·kg⁻¹、70.40 mg·kg⁻¹、24.20 mg·kg⁻¹ 和 127.40 mg·kg⁻¹,在 2023—2024 年度分别为 18.90 g·kg⁻¹、0.78 g·kg⁻¹、76.15 mg·kg⁻¹、26.80 mg·kg⁻¹、135.70 mg·kg⁻¹,两年 pH 值分别为 8.3 和 8.6。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,分别以氮肥和品种为主区和副区,其中氮肥设 0、120、240 kg·hm⁻²(分别记为 N0、N1 和 N2)3 个施氮水平。供试冬小麦材料为大穗型品种郑麦 618(国审麦 20180027)、武农 981(国审麦 20210154)、濮麦 116(国审麦 20220021)及多穗型品种郑麦 16(国审麦 20210016)、郑麦 22(国审麦 20210033)、西农 529(国审麦 20170001)。大穗型和多穗型品种基本苗分别为 270 万和 240 万株·hm⁻²。小区面积 12 m²(3 m×4 m),行距为 20 cm,4 次重复。氮肥按照基追比 1:1 的比例施入,基肥于旋耕时均匀施入,追肥于拔节期追施,P₂O₅ 120 kg·hm⁻² 和 K₂O 120 kg·hm⁻² 均在旋耕时一次性底施。分别于 2022 年 10 月 15 日和 2023 年 10 月 18 日播种,2023 年 6 月 1 日和 2024 年 6 月 1 日收获。于越冬期,拔节期和开花期将试验田灌水至田间最大持水量的 70%。其他管理同当地高产田。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 根样采集及形态性状的测定和调查

分别于返青期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期,使用内径为 10 cm 的根钻进行取样,取 0~40 cm 土层根系样品,每 20 cm 为一层。每个取样点分别在麦行中间和紧贴麦行各取 1 钻,两钻根系样品混合,每个处理 3 个重复。所取样品放

入 100 目的网袋中,反复冲洗至网袋中仅剩下根系,然后倒入盆中,去除杂质,根系放入自封袋冰箱保存,用于根系形态指标测定。

用 Expression 12000xl 根系扫描仪(美国 Epson 公司)将根系扫描成 TIF 图片文件,然后用 Win RHIZO 图像分析软件对 TIF 图片进行分析,得到总根长、根表面积等数据。测定完成后,105 °C 杀青 30 min,后 80 °C 烘干至恒重,用天平称重,获得根系干重。

1.3.2 单株次生根数和根系活力调查

在上述取样时期每小区选取 6 株长势均匀一致的植株,采用简单挖掘法挖取 20 cm 土根系,冲洗干净,调查其单株次生根数,并采用改良氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[20]测定根系活力。

1.3.3 茎蘖数调查

齐苗后,每小区选 1 m 长势一致的 2 行植株,插杆标记,在三叶期、返青期、拔节期、开花期和成熟期调查群体总茎数(穗数),并计算分蘖成穗率即单位面积穗数占最大茎蘖数百分比。

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2010 进行数据整理分析与作图。采用 SPSS 20 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 小麦根系形态数量性状和根系活性的动态变化

2.1.1 单株次生根数动态变化特征

小麦单株次生根数随生育进程的推进呈先增后减趋势,开花期达到峰值,两年度变化趋势一致(图 1)。单株次生根数随施氮水平提高而增加,且不同施氮水平间差异均显著($P < 0.05$)。在 N0、N1、N2 条件下,大穗型品种的最大单株次生根数分别为 28.9、36.6 和 40.9 条,多穗型品种分别为 35.5、42.4 和 48.3 条。大穗型品种的平均单株次生根数小于多穗型品种,除返青期外,其余时期差异均达到显著水平。

2.1.2 根干重密度动态变化特征

两年结果(表 1)表明,从整个生育期来看,根干重密度呈先升后降趋势,开花期达到峰值;根干重密度随施氮水平的提高而提高,不同施氮水平间差异达显著水平。在 N0、N1、N2 条件下,大穗型品种的最大根干重密度在 0~20 cm 土层中分别达到 286.47、403.65 和 482.92 g·m⁻³,多穗型品种分别达到 259.58、337.07 和 427.67 g·

m^{-3} ;在20~40 cm土层中大穗型品种分别达到77.17、113.78和147.94 $g \cdot m^{-3}$,多穗型品种分别达到69.68、104.91和132.64 $g \cdot m^{-3}$ 。大穗型品种的平均根干重密度均高于多穗型品种,除返青期外其余时期差异均显著。

2.1.3 根长密度动态变化特征

根长密度均随生育进程呈先升后降趋势,开花期达到峰值,两年变化趋势一致(表2)。根长密度随施氮水平提高而增加,不同施氮水平间差异均达显著水平。在N0、N1、N2条件下,0~20 cm土层中,大穗型品种的最大根长密度分别达到1.59、2.48和2.75 $m \cdot m^{-3}$,多穗型品种分别达到1.53、2.20和2.44 $m \cdot m^{-3}$;20~40 cm土层中,大穗型品种的最大根长密度分别达到0.26、0.40和0.46 $m \cdot m^{-3}$,多穗型品种分别达到0.24、0.35和0.40 $m \cdot m^{-3}$ 。大穗型品种的平均根长密度高于多穗型品种,除返青期外其余时期差异均显著。

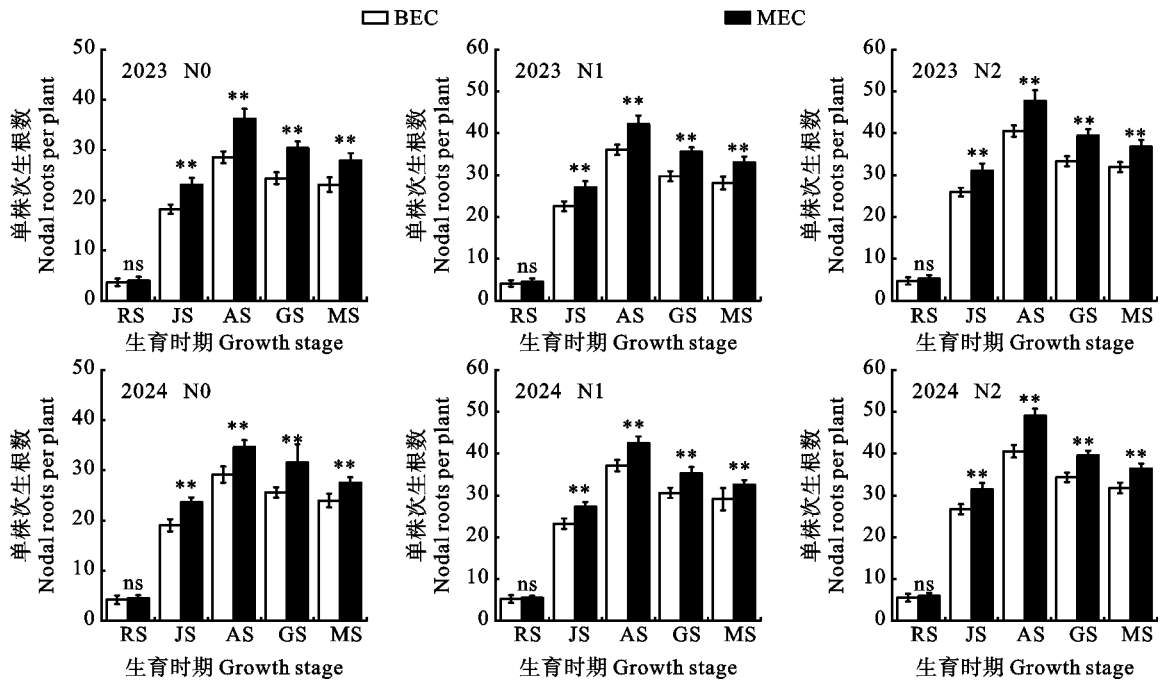
2.1.4 根表面积密度动态变化特征

在小麦整个生育期,根表面积密度呈先升后降的变化趋势,开花期达到峰值,两年变化趋势一致(表3)。根表面积密度随施氮水平提高而增加,不同施氮水平间差异均达显著水平。N0、

N1、N2条件下,0~20 cm土层中,大穗型品种的最大根表面积密度分别为13.41、18.31和21.49 $m^2 \cdot m^{-3}$,多穗型品种分别为12.18、16.81和19.62 $m^2 \cdot m^{-3}$;20~40 cm土层中,大穗型品种的最大根表面积密度分别为2.69、3.68和4.31 $m^2 \cdot m^{-3}$,多穗型品种分别为2.45、3.37和3.93 $m^2 \cdot m^{-3}$ 。大穗型品种的平均根表面积密度高于多穗型品种,除返青期外其余时期差异均显著。

2.1.5 根系活性动态变化特征

两年试验结果(图2)表明,随生育时期的推进,根系活力呈先升后降的变化趋势,拔节期达到峰值。根系活力随施氮水平提高而增加,不同施氮水平间差异均显著。N0、N1、N2条件下,大穗型品种的最高根系活力分别为82.08、151.89和159.97 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$,多穗型品种的最高根系活力分别为71.53、138.84和353.68 $\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 。大穗型品种的平均根系活力高于多穗型品种,其中2023年在返青期、拔节期和开花期差异均显著,2024年度在返青期、拔节期差异均显著。在N0、N1、N2条件下,大穗型品种的平均根系活力比多穗型品种分别高10.12%~15.01%、9.53%~18.62%、9.27%~20.73%。



RS:返青期;JS:拔节期;AS:开花期;GS:灌浆期;MS:成熟期。BEC:大穗型品种;MEC:多穗型品种。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: $P > 0.05$ 。下同。

RS: Re-growing stage; JS: Jointing stage; AS: Anthesis stage; GS: Grain-filling stage; MS: Maturity stage. BEC: Big-ear cultivar; MEC: Multi-ear cultivar. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: $P > 0.05$. The same in belows.

图1 小麦不同生育时期单株次生根数的动态变化

Fig. 1 Dynamics of wheat nodal roots per plant at different growth stages

表 1 小麦不同生育时期根干重密度的动态变化
Table 1 Dynamics of wheat root dry weight density at different growth stages

$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

年份 Year	土层 Soil layer/cm	施氮水平 Nitrogen level	穗型 Ear type	生育时期 Growth stage					
				RS	JS	AS	GS	MS	
2023	0~20	N0	BEC	177.41c	202.35d	283.66e	259.03e	246.34d	
			MEC	176.40c	196.15e	257.80f	236.90f	224.01e	
		N1	BEC	205.20b	246.32c	399.81c	318.69c	278.81c	
			MEC	207.23b	240.91c	334.45d	290.56d	251.40d	
		N2	BEC	228.35a	278.36a	477.79a	383.52a	316.38a	
			MEC	223.68a	270.68b	423.83b	355.80b	287.30b	
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value			EC	ns	**	**	**	**
				N	**	**	**	**	**
				EC×N	ns	ns	ns	ns	ns
	20~40	N0	BEC	49.63c	67.47e	74.84e	52.87cd	38.61d	
			MEC	49.43c	55.13f	67.53f	46.93e	32.71f	
			N1	BEC	57.62b	83.49b	109.79c	65.86b	42.97b
				MEC	57.86b	71.63d	100.94b	51.38d	36.11e
			N2	BEC	63.38a	101.59a	142.82a	73.68a	46.65a
				MEC	63.19a	80.21c	127.52b	55.06c	40.84c
<i>F</i> 值 <i>F</i> value			EC	ns	**	**	**	**	
			N	**	**	**	**	**	
			EC×N	ns	ns	ns	ns	ns	
2024		0~20	N0	BEC	183.11c	212.61e	289.28e	261.60e	252.42d
				MEC	179.09c	201.58f	261.36f	242.57f	220.61e
			N1	BEC	214.87b	260.98c	407.49c	323.60c	286.73c
	MEC			211.40b	248.71d	339.69d	296.88d	258.76d	
	N2		BEC	240.52a	294.71a	488.04a	393.38a	326.98a	
			MEC	236.61a	272.32b	431.50b	364.23b	296.63b	
	<i>F</i> 值 <i>F</i> value			EC	ns	**	**	**	**
				N	**	**	**	**	**
				EC×N	ns	ns	ns	ns	ns
	20~40	N0	BEC	49.40c	70.68e	79.49e	58.48e	40.95e	
			MEC	49.12c	58.88f	71.82f	48.67f	37.22f	
			N1	BEC	58.01b	88.82c	117.76c	73.11c	47.64c
				MEC	57.08b	78.14d	108.87d	56.18d	43.46d
			N2	BEC	64.94a	108.70a	153.05a	82.99a	55.89a
				MEC	63.88a	87.21b	137.75b	62.70b	52.21b
<i>F</i> 值 <i>F</i> value			EC	ns	**	**	**	**	
			N	**	**	**	**	**	
			EC×N	**	**	**	**	**	

同列数值后不同小写字母表示同一年相同土层下不同处理间差异显著。下表同。

Different letters after the same columns indicate significant differences among the treatments in the same soil layers in the same years. The same in tables 2-5.

表 2 小麦不同生育时期根长密度的动态变化
Table 2 Dynamics of wheat root length density at different growth stages

$m \cdot m^{-3}$

年份 Year	土层 Soil layer/cm	施氮水平 Nitrogen level	穗型 Ear type	生育时期 Growth stage				
				RS	JS	AS	GS	MS
2023	0~20	N0	BEC	0.88d	1.08d	1.55d	1.35d	1.17d
			MEC	0.84d	0.97e	1.49d	1.26e	1.16d
		N1	BEC	1.06b	1.40b	2.42b	2.04b	1.87b
			MEC	0.97c	1.24c	2.14c	1.82c	1.64c
		N2	BEC	1.22a	1.57a	2.66a	2.34a	2.04a
			MEC	1.09b	1.39b	2.39b	2.08b	1.88b
	F 值 F value	EC	**	**	**	**	**	
		N	**	**	**	**	**	
		EC×N	ns	ns	ns	ns	ns	
	20~40	N0	BEC	0.06c	0.11d	0.27d	0.24d	0.23d
			MEC	0.06c	0.09e	0.25d	0.24d	0.22d
		N1	BEC	0.07b	0.14b	0.41b	0.37b	0.36b
			MEC	0.06c	0.12c	0.36c	0.33c	0.32c
		N2	BEC	0.08a	0.16a	0.47a	0.41a	0.40a
			MEC	0.07b	0.14b	0.42b	0.38b	0.35b
	F 值 F value	EC	**	**	**	**	**	
		N	**	**	**	**	**	
		EC×N	ns	ns	ns	ns	ns	
2024	0~20	N0	BEC	0.96d	1.23d	1.62d	1.41d	1.22d
			MEC	0.89d	1.08e	1.56d	1.29e	1.20d
		N1	BEC	1.17b	1.37c	2.54b	2.12b	1.95b
			MEC	1.04c	1.31c	2.25c	1.89c	1.69c
		N2	BEC	1.46a	1.69a	2.83a	2.44a	2.14a
			MEC	1.19b	1.61b	2.49b	2.17b	1.96b
	F 值 F value	EC	**	**	**	**	**	
		N	**	**	**	**	**	
		EC×N	ns	ns	ns	ns	ns	
	20~40	N0	BEC	0.07c	0.12d	0.24d	0.23e	0.21e
			MEC	0.06d	0.11e	0.22e	0.22e	0.20e
		N1	BEC	0.08b	0.15b	0.38b	0.35b	0.32b
			MEC	0.07c	0.13c	0.33c	0.30d	0.28d
		N2	BEC	0.09a	0.17a	0.45a	0.40a	0.37a
			MEC	0.08b	0.15b	0.37b	0.33c	0.30c
	F 值 F value	EC	**	**	**	**	**	
		N	**	**	**	**	**	
		EC×N	ns	ns	ns	ns	ns	

2.2 小麦茎蘖数动态变化及分蘖成穗率

2.2.1 茎蘖数动态变化特征

小麦田间茎蘖数随生育期推进呈现先升后降的变化趋势,拔节期达到峰值,两年结果一致(图 3)。N0、N1、N2 条件下,大穗型品种的最大茎蘖

数分别为 898.91 万、1 306.18 万和 1 498.53 万·hm⁻²,多穗型品种的最大田间茎蘖数分别为 1 110.06 万、1 473.98 万和 1 892.38 万·hm⁻²。大穗型品种的平均茎蘖数显著低于多穗型品种。

表 3 小麦不同生育时期根表面积密度的动态变化
Table 3 Dynamics of wheat root surface area density of wheat at different growth stages $m^2 \cdot m^{-3}$

年份 Year	土层 Soil layer/cm	施氮水平 Nitrogen level	穗型 Ear type	生育时期 Growth stage				
				RS	JS	AS	GS	MS
2023	0~20	N0	BEC	5.60c	7.87d	11.38e	9.67e	8.82e
			MEC	4.92e	7.34e	10.34c	8.42f	7.67f
		N1	BEC	6.20b	8.85b	15.54d	12.28c	11.18c
			MEC	5.34d	8.12c	14.27f	10.47d	9.53d
		N2	BEC	6.77a	9.36a	18.24a	14.49a	13.18a
			MEC	5.74c	8.70b	16.64b	12.72b	11.58b
		F 值 F value	EC	**	**	**	**	**
			N	**	**	**	**	**
			EC×N	ns	ns	ns	ns	ns
	20~40	N0	BEC	1.12c	1.57d	2.23e	1.86e	1.66e
			MEC	0.98e	1.47e	2.03f	1.62f	1.45f
		N1	BEC	1.24b	1.77b	3.05c	2.36c	2.11c
			MEC	1.07d	1.62c	2.80d	2.01d	1.80d
		N2	BEC	1.35a	1.87a	3.58a	2.79a	2.49a
			MEC	1.15c	1.74b	3.26b	2.45b	2.16b
		F 值 F value	EC	**	**	**	**	**
			N	**	**	**	**	**
			EC×N	ns	ns	ns	ns	ns
2024	0~20	N0	BEC	7.02c	10.23d	15.43e	11.72e	10.40e
			MEC	6.17e	9.54e	14.02f	10.19f	9.04f
		N1	BEC	7.77b	11.50b	21.07c	14.86c	13.19c
			MEC	6.69d	10.55c	19.35d	12.67d	11.25d
		N2	BEC	8.49a	12.17a	24.76a	17.53a	15.56a
			MEC	7.20c	11.31b	22.56b	15.40b	13.66b
		F 值 F value	EC	**	**	**	**	**
			N	**	**	**	**	**
			EC×N	ns	ns	ns	ns	ns
	20~40	N0	BEC	1.39d	2.11d	3.15e	2.52e	2.20e
			MEC	1.22f	1.97e	2.86f	2.19f	1.91f
		N1	BEC	1.54b	2.37b	4.30c	3.19c	2.78c
			MEC	1.32e	2.18c	3.94d	2.72d	2.37d
		N2	BEC	1.68a	2.51a	5.04a	3.76a	3.28a
			MEC	1.42c	2.33b	4.60b	3.30b	2.88b
		F 值 F value	EC	**	**	**	**	**
			N	**	**	**	**	**
			EC×N	ns	ns	ns	ns	ns

2.2.2 单位面积穗数和单株成穗数的变化

两年结果(表 4)表明,随施氮水平的提高,小麦最大茎蘖数、单位面积穗数、单株分蘖力、单株成穗数均呈增加趋势,分蘖成穗率呈降低趋势,不同施氮水平间各指标差异均达显著水平。大穗型品种的单位面积穗数、单株穗数及

分蘖成穗率平均值均显著低于多穗型品种。N0、N1、N2 条件下,大穗型品种的单位面积穗数比多穗型品种分别少 142.58 万、117.22 万和 112.75 万 $\cdot \text{hm}^{-2}$,单株成穗数分别少 0.78、0.68 和 1.06 个,分蘖成穗率分别低 3.86、3.68 和 3.74 个百分点。

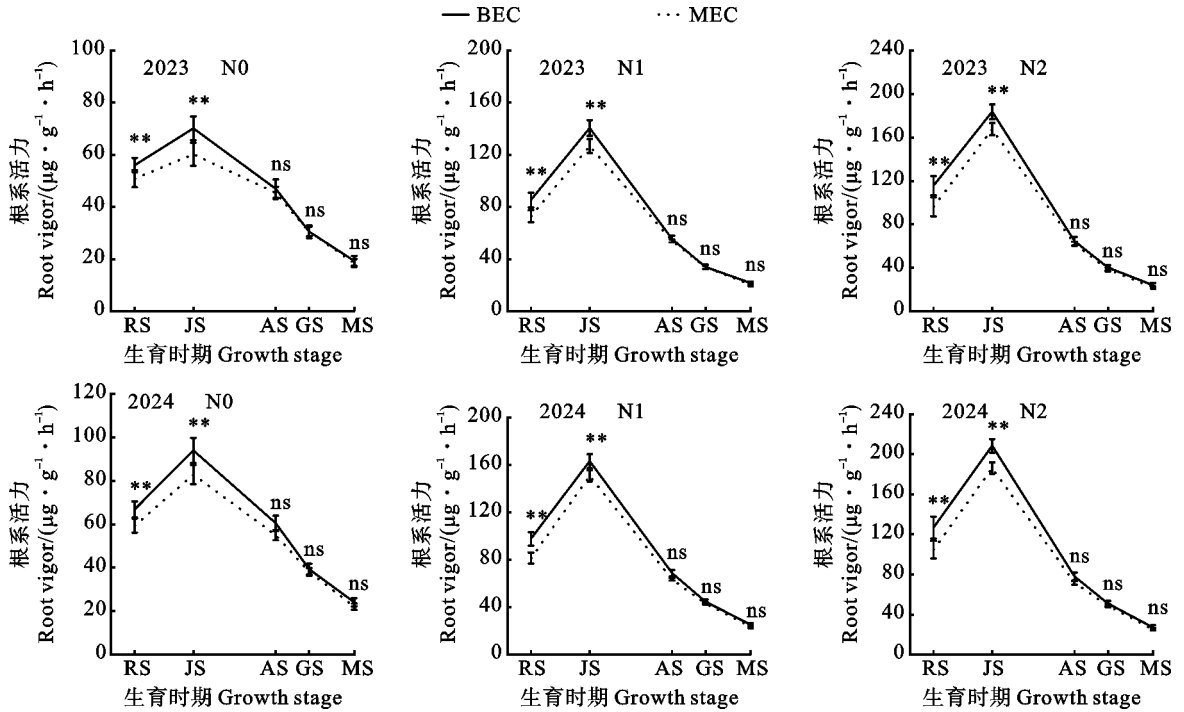
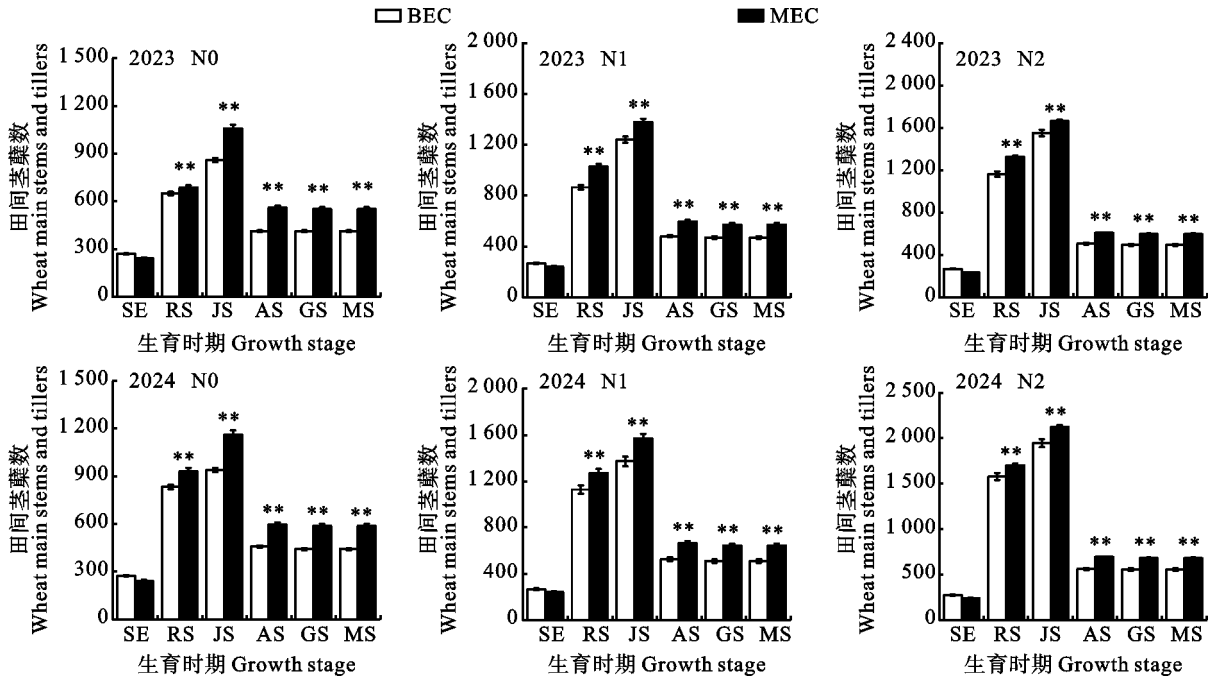


图2 小麦不同生育时期根系活性的动态变化

Fig. 2 Dynamics of wheat root vigor at different growth stages



SE: 基本苗数。

SE: Seedling number.

图3 小麦不同生育时期茎蘖数的动态变化

Fig. 3 Dynamics of wheat main stems at different growth stages

2.3 小麦分蘖成穗与根系性状的相关性

相关性分析(表5)表明,单株次生根数、根系活力、根干重密度、根长密度及根表面积密度在返

青期、拔节期和开花期与最大茎蘖数呈显著或极显著的正相关;分蘖成穗数在返青期、拔节期和开花期与单株次生根数呈显著正相关,根系活力、根

表 4 不同施氮条件下小麦不同穗型品种茎蘖数、穗数和分蘖成穗率的变化

Table 4 Changes of stems, ears, ear-bearing tiller percentage of different ear-type wheat cultivars under different nitrogen levels

年份 Year	施氮水平 Nitrogen level	穗型 Ear type	最大茎蘖数 Maximum tillers/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单位面积穗数 Ears per unit soil area/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单株分蘖数 Tillers per plant	单株成穗数 Ears per plant	分蘖成穗率 Earbearing tiller percentage/%
2023	N0	BEC	859.71f	412.34e	3.19e	1.53e	47.96b
		MEC	1 059.23e	551.38b	4.38d	2.28b	52.05a
	N1	BEC	1 240.84d	471.68d	4.63c	1.76d	38.01d
		MEC	1 378.45c	572.49ab	5.70b	2.37ab	41.53c
	N2	BEC	1 551.21b	496.58c	5.73b	1.83c	32.01f
		MEC	1 661.45a	597.75a	7.06a	2.54a	35.98e
	F 值 F value	EC	**	**	**	**	**
		N	**	**	**	**	**
		EC×N	ns	ns	ns	ns	ns
	2024	N0	BEC	938.11f	440.34f	3.43f	1.61e
MEC			1 160.89e	586.45c	4.79e	2.42b	50.52a
N1		BEC	1 371.52d	509.65e	5.14d	1.91d	37.16d
		MEC	1 569.50c	643.28b	6.49c	2.66ab	40.99c
N2		BEC	1 947.32b	555.21d	7.12b	2.03c	28.51f
		MEC	2 123.30a	679.55a	8.78a	2.81a	32.01e
F 值 F value		EC	**	**	**	**	**
		N	**	**	**	**	**
		EC×N	ns	ns	ns	ns	ns

表 5 小麦分蘖成穗和根系性状的相关性

Table 5 Correlation between ear-bearing tiller development and root traits

生育时期 Growth stage	根系性状 Root trait	土层 Soil layer/cm	最大茎蘖数 Maximum tillers	分蘖成穗数 Ear-bearing tillers	分蘖成穗率 Ear-bearing tiller percentage	
RS	NRPP	—	0.819**	0.760**	-0.651**	
		RV	—	0.828**	0.255	-0.855**
	RDWD	0~20	0.830**	0.464*	-0.753**	
		20~40	0.899**	0.521*	-0.663**	
	RLD	0~20	0.797**	0.212	-0.892**	
		20~40	0.726**	0.149	-0.821**	
	RSAD	0~20	0.536*	0.172	-0.573*	
		20~40	0.535*	0.254	-0.588*	
	JS	NRPP	—	0.668**	0.817**	-0.678**
			RV	—	0.886**	0.396
RDWD		0~20	0.867**	0.352	-0.878**	
		20~40	0.705**	0.434*	-0.640**	
RLD		0~20	0.843**	0.568*	-0.841**	
		20~40	0.755**	0.319	-0.746**	
RSAD		0~20	0.618**	0.343	-0.508*	
		20~40	0.597*	0.327	-0.566*	
AS		NRPP	—	0.879**	0.832**	-0.639**
			RV	—	0.811**	0.375
	RDWD	0~20	0.790**	0.496*	-0.784**	
		20~40	0.877**	0.341	-0.867**	
	RLD	0~20	0.807**	0.390	-0.876**	
		20~40	0.691**	0.333	-0.671**	
	RSAD	0~20	0.840**	0.416*	-0.781**	
		20~40	0.823**	0.422*	-0.743**	

NRPP:单株次生根数;RV:根系活力;RDWD:根干重密度;RLD:根长密度;RSAD:根表面积密度。

NRPP: Nodal roots per plant; RV: Root vigor; RDWD: Root dry weight density; RLD: Root length density; RSAD: Root surface area density.

干重密度、根长密度和根表面积密度则与分蘖成穗数呈弱正相关或相关性未达显著水平;单株次生根数、根系活力、根干重密度、根长密度和根表面积密度在返青期、拔节期和开花期与分蘖成穗率呈显著或极显著负相关。以上结果说明,较高的最大茎蘖数有利于根群的构建和生长,而健壮的根系则能在一定程度上提高分蘖成穗数,但并不利于分蘖成穗率的提高。

3 讨论

3.1 小麦品种根系活力与根系形态发育特征

作物生长发育所需要的养分和水分主要来源于根系的吸收,但受其根系形态特征(如根重、根长、细根数量等)的影响非常明显^[9],因此高产小麦根系必须既具有一定的根系数量,又必须具有较强的生理活性。

有研究^[19]报道,小麦在0~20 cm土层的根系活力以越冬期最高,之后逐渐下降,在抽穗期降至较低点后,又缓慢上升,并于灌浆期出现一个小峰值后又开始下降直至成熟期。而周燕等^[18]认为,随着生育时期的推进,小麦根系活力呈“高低-高-低”变化,于越冬期和拔节期达较高水平。刘世洁等^[20]的试验结果显示,小麦0~20 cm土层的根系活力于拔节期最高,之后随生育期的推进呈下降趋势。本研究中,两种穗型小麦在0~20 cm土层的根系活力也在拔节期达到峰值,随后逐渐下降。本研究中,在不同施氮条件下,0~40 cm土层中两种穗型小麦的根长密度、根质量密度、根表面积密度在所调查时期内均在开花期达到最大值,随后逐渐下降,说明小麦在营养生长阶段对养分的需求较高,因而在越冬期和拔节期拥有较高的根系活力,返青期的根系活力较低可能是因为冬季小麦生长速度缓慢,在此期间小麦对养分需求强度不大。而开花期小麦已经进入生殖生长为主的时期,根系逐渐衰老,根系活力也随之逐渐下降。单株次生根数、根干重密度、根表面积密度和根长密度在开花期达到峰值后,随后逐渐下降则表明生殖生长阶段根系的逐渐衰老和物质转运向地上部的转移。陈娟等^[21]研究表明,适宜的施氮量能增加根表面积。然而张伟等^[22]认为施氮增加了小麦表层根重,Christos等^[23]则认为施氮提高了小麦的根干重,改变了根系的解剖结构,产生更多的根毛。本研究中,施氮提高了次生根数,增强了根系活力,提高了0~40cm土层

的根表面积密度、根干重密度和根长密度,与前人研究结果一致。

大穗型小麦品种的根系活力、根干重密度等指标略高于多穗型品种,大穗型小麦拥较强的根系活力^[19]。邱喜阳等^[21]研究发现,大穗型和多穗型小麦0~40 cm土层的根干重密度均在抽穗期达到峰值随后逐渐下降,且大穗型品种的根系形态性状指标高于多穗型品种。本试验的研究结果与前人研究基本一致,即大穗型品种的单株次生根数低于多穗型品种,而根系活力、根表面积密度、根干重密度以及根长密度均表现为大穗型品种高于多穗型品种。施氮能够增强根系活力,提高次生根数,根表面积密度、根干重密度以及根长密度。

3.2 小麦品种根系特征与分蘖成穗的关系

小麦根系生长发育与地上部植株的生长发育既相互促进又相互制约,次生根数目随着分蘖的增多而增加,但此期间根系形态性状变化幅度较小。相关性分析表明,小麦返青期、拔节期和开花期的根系性状与最大分蘖数呈显著或极显著正相关,说明分蘖群体是根群构建以及根系生长的基础,在返青期至开花期,由于分蘖的光合作用增强,向根系输送更多的光合产物和营养物质,促进根系的生长和发育,同时健壮的根系也为地上部提供更多的水分和养分^[25]。

在起身拔节以后,主茎和低位健壮大蘖发育成穗,高位分蘖成为无效分蘖并逐渐衰亡,无效分蘖虽不成穗^[26],但无效分蘖的次生根并不会消亡^[9]。有研究表明,无效分蘖次生根数量与单位面积成穗数呈正相关,并能够提高产量^[27-28]。本试验中,小麦返青期、拔节期和开花期的单株次生根数与单位面积成穗数呈显著正相关,表明较高的次生根数量会提高单位面积成穗数。这与前人的研究结果类似。由于拔节期至开花期小麦生长发育包含幼穗和小花分化、茎节伸长和无效分蘖消亡等过程,此阶段根系活力、根干重、根长和根表面积等这些根系形态性状共同作用于穗的形成,而麦穗形成应从质量和数量两个方面来评价,相关分析时仅考虑了成穗的数量,这可能是导致根系活力、根干重、根长和根表面积与单位面积成穗数呈弱正相关的主要原因。

小麦分蘖数量变化的动态过程中,越冬前形成的较早低位蘖最终成穗率较高,但之后出生的较晚高位蘖,常因长势不强且小穗分化开始时无

法积累一定的营养物质供应穗部生长而形成无效分蘖^[29-30]。相关性分析表明,小麦返青期、拔节期和开花期的根系性状与分蘖成穗率呈显著或极显著负相关。本研究认为,高位分蘖的发生往往伴随着根系的发生,从而增加了次生根数,过多的高位分蘖必然加大了水分和养分的需求,可能会刺激次生根增强其功能,高位分蘖最终不会成穗而消亡,但次生根并没有随之消亡,低位分蘖成穗正需要这些次生根为之提供更多的水肥和有机物质,因此出现了分蘖群体很高,根系也比较健壮的情况下,其分蘖成穗率却较低的状况。

影响分蘖成穗和根系的因子较多,如播期、密度、水分、中耕和镇压等多种环境因子和农艺措施都可能影响分蘖成穗。本试验仅考虑了品种和氮肥两个对分蘖成穗和根系影响较大的因子,此外,本试验仅对分蘖进行了简单的数量调查,未来可进一步对分蘖进行细化分级,深入研究根系发育对具体蘖位的分蘖成穗效应。

4 结论

本试验条件下,施氮能够增强根系活力,提高次生根数,根表面积密度、根干重密度、根长密度、最大茎蘖数和单位面积成穗数,但会降低分蘖成穗率;大穗型品种比多穗型品种拥有更高的根系活力、根表面积密度、根干重密度以及根长密度,但其次生根数、最大茎蘖数、单位面积成穗数和分蘖成穗率低于多穗型品种。小麦单株次生根数和根干重密度的增加有利于最大茎蘖数和分蘖成穗数的提高;根系活力、根长密度和根表面积密度的增加则仅有利于最大茎蘖数的提高,对分蘖成穗数无明显影响;分蘖成穗率则随根系数量和形态指标的增加而下降。建议生产实践中,促进次生根合理生长以适量增加数量提高形态特征,从而协调田间最大茎蘖数、分蘖成穗数和分蘖成穗率。

参考文献:

[1] FERRANTE A, SAVIN R, SLAFER G A. Floret development of durum wheat in response to nitrogen availability Open Access [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(15): 4353.

[2] WAI A H, AN G. Axillary meristem initiation and bud growth in rice [J]. *Journal of Plant Biology*, 2017, 60(5): 447.

[3] ZHUANG L L, GE Y, WANG J, et al. Gibberellic acid inhibition of tillering in tall fescue involving crosstalks with cytokinins and transcriptional regulation of genes controlling axillary bud outgrowth [J]. *Plant Science*, 2019, 287: 114.

[4] SARATH G, BAIRD L M, MITCHELL R B. Senescence, dormancy and tillering in perennial C4 grasses [J]. *Plant Science*, 2014, 217: 147.

[5] HU Y S, REN T H, LI Z, et al. Molecular mapping and genetic analysis of a QTL controlling spike formation rate and tiller number in wheat [J]. *Gene*, 2017, 634: 15.

[6] SCOTT TILLEY M, HEINIGER R W, CROZIER C R. Measuring tiller development and mortality in winter wheat under field conditions [J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2019, 2(1): 180066.

[7] TILLEY M S, HEINIGER R W, CROZIER C R. Tiller initiation and its effects on yield and yield components in winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(3): 1325.

[8] 崔金梅, 郭天财. 小麦的穗[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 89.

CUI J M, GUO T C. Spike of wheat [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 89.

[9] 马元喜. 小麦的根[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 147.

MA Y X. [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 147.

[10] SMITH S, DE SMET I. Root system architecture: Insights from *Arabidopsis* and cereal crops [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2012, 367(1595): 1441.

[11] SHORINOLA O, KAYE R, GOLAN G, et al. Genetic screening for mutants with altered seminal root numbers in hexaploid wheat using a high-throughput root phenotyping platform [J]. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 2019, 9(9): 2780.

[12] 梅四卫, 朱涵珍, 王术, 等. 小麦根系研究现状及展望[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(12): 5449.

MEI S W, ZHU H Z, WANG S, et al. Research situation and prospects of wheat root system [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2018, 37(12): 5449.

[13] PEDRO A, SAVIN R, PARRY M A J, et al. Selection for high grain number per unit stem length through four generations from mutants in a durum wheat population to increase yields of individual plants and crops [J]. *Field Crops Research*, 2012, 129: 67.

[14] 方燕, 闵东红, 高欣, 等. 不同抗旱性冬小麦根系时空分布与产量的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2922.

FANG Y, MIN D H, GAO X, et al. Relationship between spatiotemporal distribution of roots and grain yield of winter wheat varieties with differing drought tolerance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2922.

[15] 梁文宪. 不同穗型的小麦品种根穗发育特征及其相关性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024: 12.

LIANG W X. *Study on the developmental characteristics and correlation of roots and spikes in wheat (Triticum aestivum L.) with different spike types* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024: 12.

[16] 盛坤. 两种穗型冬小麦品种碳氮代谢与分蘖成穗关系的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009: 39.

- SHENG K. *Study on relationship among carbon and nitrogen metabolisms and spike formation from tillers in two winter wheat cultivars with different spike types* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009: 39.
- [17] 梅晶晶, 周苏玫, 徐凤丹, 等. 小麦根蘖发育和产量对耕作和追氮方式以及施氮量的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1070.
- MEI J J, ZHOU S M, XU F D, *et al.* Response of root and tiller development and yield of wheat to tillage and nitrogen topdressing patterns and nitrogen application rates [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(6): 1070.
- [18] 周燕, 杨习文, 周苏玫, 等. 小麦根中NADP-脱氢酶系统关键酶活性与根系活力和产量的关系分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2068.
- ZHOU Y, YANG X W, ZHOU S M, *et al.* Activities of key enzymes in root NADP-dehydrogenase system and their relationships with root vigor and grain yield formation in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2068.
- [19] 马冬云, 郭天财, 朱云集, 等. 不同穗型冬小麦品种根系时空分布特征及其碳氮代谢的研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(4): 780.
- MA D Y, GUO T C, ZHU Y J, *et al.* Temporal and spatial root distribution and carbon and nitrogen metabolism of wheat varieties with different spike shapes [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(4): 780.
- [20] 刘世洁, 杨习文, 马耕, 等. 灌水和施氮对冬小麦根系特征及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(8): 2304.
- LIU S J, YANG X W, MA G, *et al.* Effects of water and nitrogen application on root characteristics and nitrogen utilization in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(8): 2304.
- [21] 陈娟, 马忠明, 吕晓东, 等. 水氮互作对固定道垄作栽培春小麦根系生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1518.
- CHEN J, MA Z M, LYU X D, *et al.* Influence of different levels of irrigation and nitrogen application on the root growth and yield of spring wheat under permanent raised bed [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1518.
- [22] 张伟, 李鲁华, 吕新. 不同施氮量对滴灌春小麦根系时空分布、氮素利用率及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(2): 195.
- ZHANG W, LI L H, LÜ X. Effects of nitrogen fertilizer at different levels on spatial and temporal distribution of wheat roots, nitrogen use efficiency and yield in spring wheat under drip irrigation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(2): 195.
- [23] NOULAS C, LIEDGENS M, STAMP P, *et al.* Subsoil root growth of field grown spring wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) differing in nitrogen use efficiency parameters [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 33(13): 1899.
- [24] 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): 55.
- QIU X Y, WANG C Y, WANG Y L, *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): 55.
- [25] 王凯, 贾永红, 罗四维, 等. 播种方式和种植密度对冬小麦根系生长和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(2): 230.
- WANG K, JIA Y H, LUO S W, *et al.* Effect of sowing pattern and planting density on root growth and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(2): 230.
- [26] WANG K, JIA Y H, LUO S W, *et al.* Effect of Sowing Pattern and Planting Density on Root Growth and Yield of Winter Wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(02): 230.
- [27] 宋欣欣, 贺德先. 小麦生育后期主茎和分蘖次生根对籽粒产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2): 282.
- SONG X X, HE D X. Effect of culm and tiller nodal roots at late growing period on grain yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(2): 282.
- [28] 徐利利, 杨习文, 周苏玫, 等. 小麦无效分蘖次生根的发生与作用[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3656.
- XU L L, YANG X W, ZHOU S M, *et al.* Occurrence and function of nodal roots belonging to infertile tillers in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(11): 3656.
- [29] MADHU U, BEGUM M, SALAM A, *et al.* Influence of sowing date on the growth and yield performance of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties [J]. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 2018, 3(1): 90.
- [30] MOSAAD M G, ORTIZ-FERRARA G, MAHALAKSHMI V. Tiller development and contribution to yield under different moisture regimes in two *Triticum* species [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1995, 174(3): 176.