

迟熟半冬性小麦品种的根系特征研究

王春艳,杨习文,周苏玫,谢松鑫,贾晓雯,胡乃月,贺德先

(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:为明确小麦迟熟品种根系特征特性及其与产量形成的关系,以9个熟性不同的半冬性小麦品种为试验材料,同步开展实施室外盆栽和大田试验,系统探索了不同熟性小麦品种根系的形态、数量特征和生理特性。结果表明,迟熟品种的根长、根表面积、根体积和根干重在返青至蜡熟期均显著高于早熟和中熟品种,其中开花期比早熟品种分别高43.02%、39.26%、48.93%和31.01%,比中熟品种分别高26.13%、24.63%、33.72%和20.82%;同时,开花期迟熟品种0~100 cm土层的根长密度、根表面积密度、根体积比和根干重密度均显著高于早熟和中熟品种。开花期迟熟品种单株次生根数平均为48.27条,分别比早熟和中熟品种多6.92和5.07条。越冬至蜡熟期间,迟熟品种根系活力均显著高于早熟和中熟品种,其中拔节期比早熟和中熟品种分别高36.39%和15.02%。开花至蜡熟期间,与早熟和中熟品种相比,迟熟品种根系抗氧化酶活性显著提高,根中MDA含量和根长衰减率显著下降,其中根长衰减率降幅分别为16.19%和10.88%。综合来看,与早熟和中熟品种相比,迟熟品种的根系性状表现较好,不仅具有较优的根长、根表面积、根体积、根干重、次生根数和根系活力,还具有较优的抗衰老能力。

关键词:小麦;迟熟品种;根系;形态性状;数量性状;根系活力

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)07-0961-13

Study on Root Characteristics of Late-Maturity Semi-Winterness Wheat Varieties

WANG Chunyan, YANG Xiwen, ZHOU Sumei, XIE Songxin, JIA Xiaowen, HU Naiyue, HE Dexian

(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 450046, China)

Abstract: To identify the root characteristics of late-maturity semi-winterness wheat varieties and their relationship with yield formation, nine semi-winterness wheat varieties with different maturity were selected as experimental materials. Through the simultaneous implementation of outdoor pot and field experiments, the root morphology, quantitative and physiological characteristics of different maturity wheat varieties were comprehensively studied. The results showed that the root length, root surface area, root volume and root dry weight of late-maturity varieties were significantly higher than those of early- and medium-maturity varieties from re-greening to late maturity stage. At anthesis stage, the root length, root surface area, root volume, and root dry weight of late-maturity varieties were 43.02%, 39.26%, 48.93 and 31.01% higher than those of early-maturity varieties, and 26.13%, 24.63%, 33.72 and 20.84 higher than those of medium varieties, respectively. The root length density, root surface area density, root volume ratio, and root dry weight density of late-maturity varieties were significantly higher than those of early- and medium-maturity varieties in the 0–100 cm soil layer at

收稿日期:2024-06-25

修回日期:2024-08-22

基金项目:国家重点研发计划专项(22YFD230082);河南省科技攻关项目(242102111099)

第一作者 E-mail: wangchunyan@stu.henau.edu.cn(王春艳)

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

anthesis. The number of nodal roots per plant of late-maturity varieties was 48.27 at anthesis, which was 6.92 and 5.07 higher than that of early- and medium-maturity varieties, respectively. The root vigor of late-maturity varieties was significantly higher than that of early- and medium-maturity varieties from wintering to late maturity stage, 36.39% and 15.02% higher than that of early- and medium-maturity varieties at jointing stage, respectively. From anthesis to late maturity stage, antioxidant enzyme activity in roots of late-maturity varieties was significantly higher than that of early- and medium-maturity varieties, while malondialdehyde (MDA) content in roots was significantly lower than that of early- and medium-maturity varieties, and the root length decay rate was significantly lower than that of early- and medium-maturity varieties, with the reduction rate of 16.19% and 10.88%, respectively. In summary, compared with early- and medium-maturity varieties, late-maturity varieties have better root traits, which are reflected in root length, root surface area, root volume, root dry weight, nodal root number, root vigor, and anti-aging ability.

Keywords: Wheat; Late-maturity variety; Root system; Morphological traits; Quantitative traits; Root vigor

根系作为小麦与土壤环境交流的桥梁,承担着水分与养分吸收、植株稳固以及参与植物体内物质代谢等诸多关键功能,其与植株地上部在生长发育方面紧密相关^[1,2]。不同小麦品种根系的形态、数量特征和生理特性不同^[3-8]。抗旱小麦品种具有较高的根系生物量和根系活力^[5],氮高效品种的根系生物量、根尖数、根长、根体积、根表面积、根系活力和氮素转运能力均显著高于氮低效品种^[6,7],磷吸收高效品种具有较多、较大直径的次生根以及较高的根系生物量和活力^[8]。

小麦全生育期天数对优化种植区域布局和提高产量稳定性至关重要,是小麦育种中重要的考察因素之一。研究表明,小麦生育期天数与产量呈正相关,且生育期时长对产量的贡献率几乎与穗粒数相当^[9,10],故迟熟品种一般具有较高的产量。另外,高产品种往往具有较发达的根系,表现为根长、根直径、根表面积、根体积、根干重和根数均较高,根系活力强且生育后期衰老较晚、缓慢等^[11-14]。为揭示迟熟品种高产机制,前人已对小麦不同熟性品种的植株光合特征^[15]、地上部干物质积累特征^[16]以及籽粒灌浆特征^[17]进行了系统分析,但迄今关于小麦不同熟性品种根系特征的比较研究未见系统报道,特别是关于迟熟品种生育后期的优异性状如抗衰老能力较强等的研究与利用尚不多见。本研究以 9 个熟性不同的半冬性小麦品种为试验材料,同步开展室外盆栽和大田试验,系统探索了不同熟性小麦品种根系的形态、数量特征和生理特性,明确小麦迟熟品种根系特

征及其与产量形成的关系,以期小麦品种选育与推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021—2023 年在河南农业大学科教园区原阳基地(35°06′57″N, 113°93′99″E)进行。前茬作物为大豆,小麦播前 0~20 cm 土壤有机质含量为 18.4 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.85 g·kg⁻¹,碱解氮含量为 78.6 mg·kg⁻¹,有效磷含量为 25.8 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 125.3 mg·kg⁻¹,pH 值为 8.4。

1.2 试验材料

本试验共选取 9 个黄淮平原不同熟性的半冬性小麦品种为试验材料,各试验材料的详细信息见表 1。

1.3 试验设计与管理

试验分为室外盆栽试验(A1)和大田试验(A2)两部分,分别于 2021 年 10 月 24 日和 2022 年 10 月 16 日播种。

盆栽容器选用底部带小孔的 PVC 材质盆,直径 28 cm,高 30 cm。盆栽用土为试验田耕层土壤,过筛后与肥料拌匀装入盆中,每盆装过筛干土 10 kg,每盆基施 3.5 g 尿素、13.3 g 过磷酸钙和 3.1 g 硫酸钾,拔节期每盆追施尿素 3.5 g。每个品种种植 28 盆,共 252 盆,每盆播种 18 株,于三叶期定苗 14 株。定期进行等量灌溉和病虫害防治,以保证小麦正常生长。

表 1 试验小麦品种基本情况
Table 1 Information of the tested wheat varieties

| 序号 Number | 品种 Variety | 熟性类型 Maturity type | 生育期 Growing period/d |
|--------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 华伟 305 Huawei 305 | 早熟 Early-maturity | 223 |
| 2 | 开麦 1502 Kaimai 1502 | 早熟 Early-maturity | 224 |
| 3 | 中麦 578 Zhongmai 578 | 早熟 Early-maturity | 223 |
| 4 | 新麦 26 Xinmai 26 | 中熟 Medium-maturity | 226 |
| 5 | 百农矮抗 58 Aaikang 58 | 中熟 Medium-maturity | 225 |
| 6 | 洛麦 26 Luomai 26 | 中熟 Medium-maturity | 226 |
| 7 | 鑫华麦 818 Xinhumai 818 | 迟熟 Late-maturity | 229 |
| 8 | 新麦 35 Xinmai 35 | 迟熟 Late-maturity | 229 |
| 9 | 泉麦 890 Quanmai 890 | 迟熟 Late-maturity | 230 |

大田试验采用随机区组设计,每个品种种植 4 个小区,播种量为 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小区面积为 $15 \text{ m}^2 (3 \text{ m} \times 5 \text{ m})$ 。底施纯氮、 P_2O_5 和 K_2O 各 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮磷钾肥分别为尿素(46.7%N)、过磷酸钙(含 12% P_2O_5)和硫酸钾(含 52% K_2O)。两年试验均在小麦越冬、拔节、开花期进行灌溉,拔节期追施纯氮 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其他栽培管理措施同普通高产田。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 取样时期

室外盆栽试验和大田试验均于越冬期、返青期、拔节期、开花期和蜡熟期进行取样。

1.4.2 取样方法

室外盆栽试验的小麦根系采用冲洗法进行取样,每次取样 3 盆。选择有代表性的样品用于测定根系形态性状(单株根长、根表面积、根体积、次生根数和根干重)和根系活力,并计算开花至蜡熟期的根长衰减率。另外,于开花期和蜡熟期选取部分新鲜根系样品,迅速用锡纸包裹并置于液氮中带回实验室进行抗氧化酶活性和 MDA 含量的测定。

大田试验采用根钻法在行上进行根系取样,每小区随机取三个样点,取样深度为 $0 \sim 100 \text{ cm}$, 20 cm 为一层。调查与测量根系形态性状(根长密度、根表面积密度、根体积比、单株次生根数和根干重密度),并计算开花至蜡熟期的根长衰减率。同时,测定 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层根系样品的根系活力,测定开花期和蜡熟期 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层根系样品的抗氧化酶活性和 MDA 含量。

1.4.3 测定方法

根系形态性状的测定:通过人工计数的方法

获得单株次生根数(nodal roots, NR);使用 Expression 12000 xl 根系扫描仪(美国 Epson 公司)和 Win RHIZO 图像分析系统(加拿大 Sainte Foy 公司)测定小麦根长、根表面积、根体积等形态性状;通过计算获得根长密度、根表面积密度、根体积比、根长衰减率等参数。最后,将扫描过的根系装入信封,置于烘箱内 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,称量根干重,并计算根干重密度。根长衰减率参照张玉芹等^[18]的方法计算。

$\text{RLD} = \text{RL}/V$; $\text{RSAD} = \text{RSA}/V$; $\text{RVR} = \text{RV}/V$; $\text{RDWD} = \text{RDW}/V$ 。

式中,RLD 为根长密度($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$);RL 为根长(cm);V 为土体体积(cm^3), $V = \pi r^2 \cdot h$,其中 r 为根钻的半径, h 为根钻的高度,本试验中 $r = 5 \text{ cm}$, $h = 20 \text{ cm}$,每层土体积为 1570 cm^3 。RSAD 为根表面积密度($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$);RSA 为根表面积(cm^2);RVR 为根体积比($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$);RV 为根体积(cm^3);RDWD 为根干重密度($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$);RDW 为根干重(g)。

根系活力测定:采用改良的 TTC 法测定小麦的根系活力^[19]。

根系抗氧化酶活性及丙二醛(MDA)含量测定:超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用钼酸铵比色法测定,MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[20]。

籽粒产量和产量构成因素的测定:盆栽试验在成熟期每个品种选取长势一致的 3 盆小麦,调查每盆穗数、穗粒数及千粒重,并实收脱粒测产;大田试验在成熟期每小区选 1 m 双行的代表样段进行穗数、穗粒数及千粒重调查,再选取具有代

表性的 3 个样点(4 m²)进行实收脱粒测产。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016、SPSS 26 软件进行数据处理、图表制作和统计分析。

2 结果与分析

2.1 小麦迟熟品种根系形态数量特征

2.1.1 单株根长和根长密度

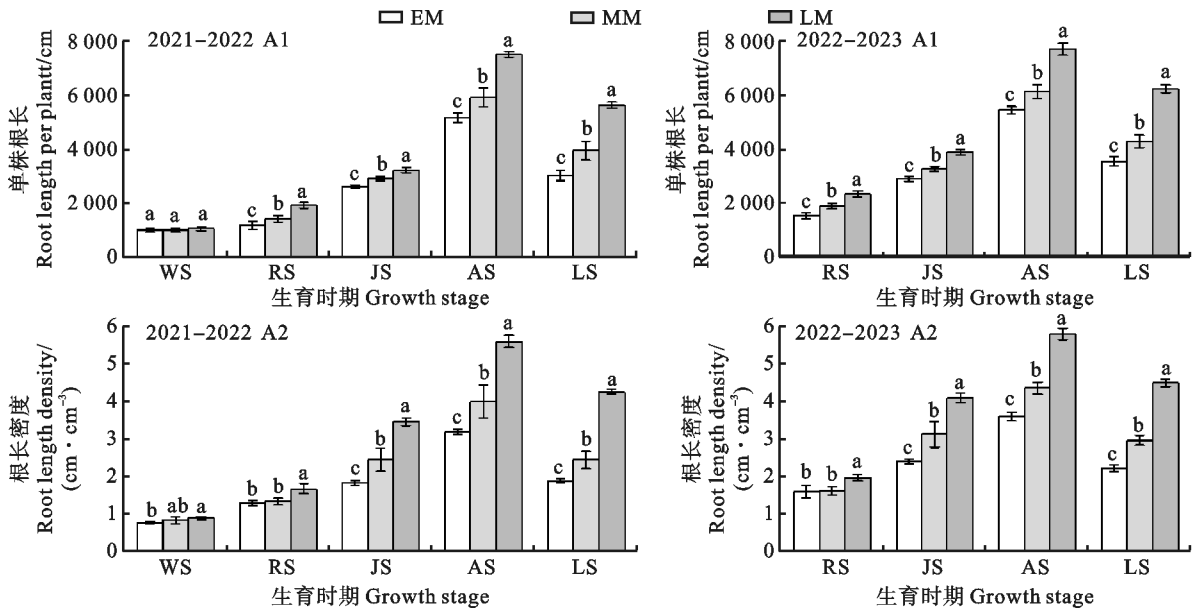
小麦不同熟性品种的单株根长和根长密度均随生育进程推进呈先升高后降低的变化趋势,在开花期达到最大值(图 1)。其中,拔节至开花期是根长的快速增长期,单株根长增长量在两个生长季节中分别占总根长的 47.31%~58.54%和 41.94%~52.42%。在不同熟性品种之间,单株根长在越冬期的差异未达显著水平,在返青至蜡熟期则表现为迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,如开花期迟熟品种单株根长比早熟和中熟品种在 2021—2022 年度分别高 45.09%和 26.87%,在 2022—2023 年度分别高 41.06%和 25.41%;根长密度在越冬期表现为迟熟品种显著高于早熟品种,而与中熟品种之间的差异未达显

著水平,在返青至蜡熟期则表现为迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种的根长密度比早熟和中熟品种在 2021—2022 年度分别高 75.93%和 40.07%,在 2022—2023 年度分别高 61.31%和 33.01%。

小麦根系在生育后期会发生衰减现象。不同熟性品种的根长衰减率总体表现为早熟品种 > 中熟品种 > 迟熟品种(表 2)。盆栽试验中,迟熟品种的根长衰减率较早熟、中熟品种分别降低 16.0 和 9.6 个百分点;大田试验中,迟熟品种的根长衰减率较早熟、中熟品种分别降低 16.4 和 12.0 个百分点。

2.1.2 单株根表面积和根表面积密度

根表面积与作物对养分的吸收能力密切相关。由图 2 可知,不同熟性品种的单株根表面积和根表面积密度随生育进程的推进均呈先升高后降低的变化趋势,且均在开花期达最大值。拔节至开花期单株根表面积的增长量在两个生长季节中分别占总根表面积的 40.44%~55.57%、42.51%~51.95%。



受新冠疫情影响,2022—2023 年度越冬期未取样。A1:室外盆栽试验;A2:大田试验。WS:越冬期;RS:返青期;JS:拔节期;AS:开花期;LS:蜡熟期。EM:早熟品种;MM:中熟品种;LM:晚熟品种。同一生育时期图柱上的不同小写字母表示不同熟性品种在 0.05 水平上差异显著。下图同。

Due to the COVID-19 epidemic situation, samples were not available at wintering stage in the growing season of 2022—2023. A1: Outdoor pot test; WS: Wintering stage; RS: Re-greening stage; JS: Jointing stage; AS: Anthesis stage; LS: Late maturity stage. EM: Early-maturity variety; MM: Medium-maturity variety; LM: Late-maturity variety. Lowercase letters above the columns in the same growth stage indicate that significant difference at 0.05 level among varieties of different maturity types. The same in figures 2—7.

图 1 不同熟性小麦品种单株根长和根长密度的动态变化

Fig. 1 Dynamics of root length per plant and root length density of wheat varieties with different maturity

表 2 不同熟性小麦品种开花至蜡熟期的根长衰减率

Table 2 Decay rate of root length from anthesis to maturity of wheat varieties with different maturity

| 年度 Year | 熟性 Maturity | 单株根长 Root length per plant | | | 根长密度 Root length density | | |
|------------|----------------|-------------------------------|------------|-----------|-----------------------------|--------------------------|----------|
| | | AS/cm | LS/cm | RLDR/% | AS/(cm·m ⁻³) | LS/(cm·m ⁻³) | RLDR/% |
| 2021—2022 | EM | 5 186±56c | 3 063±67c | 41.0±0.8a | 3.18±0.02c | 1.88±0.02c | 40.9±0.8 |
| | MM | 5 931±119b | 3 974±114b | 33.1±0.7b | 4.00±0.15b | 2.44±0.08b | 38.8±0.9 |
| | LM | 7 524±36a | 5 652±38a | 24.9±0.5c | 5.60±0.05a | 4.25±0.02a | 23.9±0.5 |
| 2022—2023 | EM | 5 468±45c | 3 575±59c | 34.5±1.4a | 3.59±0.04c | 2.21±0.03c | 38.4±0.7 |
| | MM | 6 151±88b | 4 322±77b | 29.8±0.4b | 4.35±0.05b | 2.96±0.04b | 31.9±0.8 |
| | LM | 7 714±77a | 6 258±50a | 18.8±0.8c | 5.79±0.05a | 4.49±0.03a | 22.4±0.7 |
| 均值 Mean | EM | 5 327±49c | 3 319±75c | 37.8±1.1a | 3.39±0.05c | 2.05±0.04c | 39.6±0.6 |
| | MM | 6 041±78b | 4 148±80b | 31.4±0.6b | 4.17±0.09b | 2.70±0.08b | 35.3±1.0 |
| | LM | 7 619±48a | 5 955±78a | 21.8±0.9c | 5.69±0.04a | 4.37±0.03a | 23.2±0.5 |

AS:开花期;LS:蜡熟期;RLDR:根长衰减率;EM:早熟品种;MM:中熟品种;LM:晚熟品种。同一年度同列数值后不同小写字母表示不同熟性品种在 0.05 水平上差异显著。

AS: Anthesis stage; LS: Late maturity stage; RLDR: root length decay rate; EM: Early-maturity variety; MM: Medium-maturity variety; LM: Late-maturity variety. Lowercase letters after the values in the same columns and year indicate significant difference at 0.05 level among varieties of different maturity types.

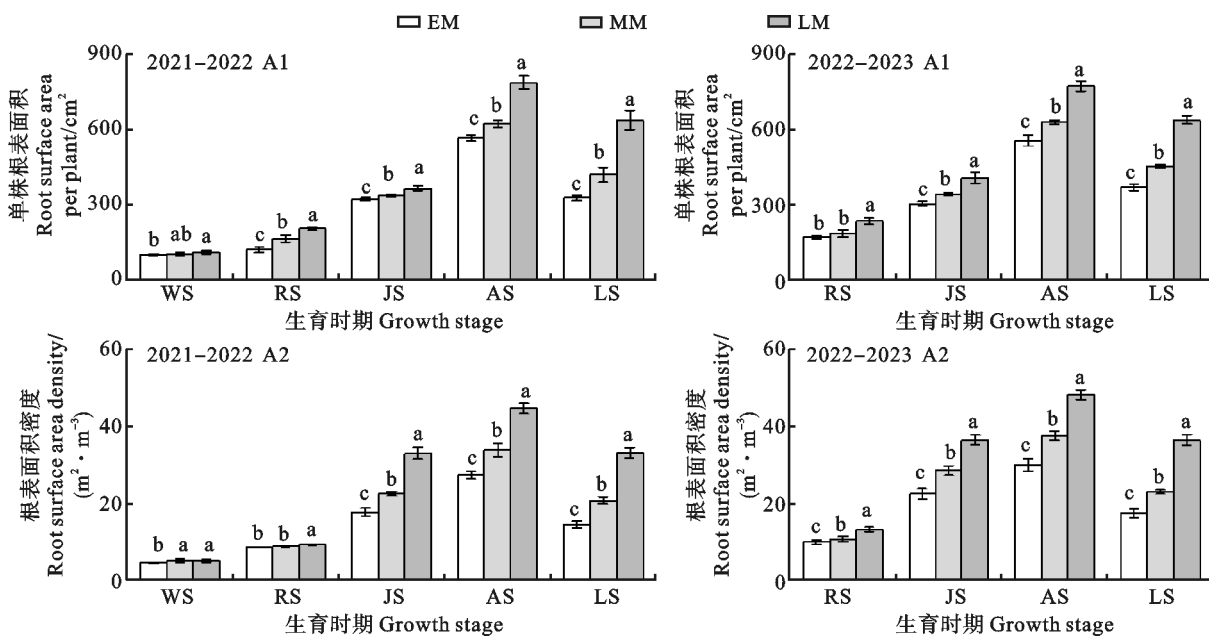


图 2 不同熟性小麦品种单株根表面积和根表面积密度的动态变化

Fig. 2 Dynamics of root surface area per plant and root surface area density of wheat varieties with different maturity

单株根表面积在越冬期表现为迟熟品种显著高于早熟品种,在返青至蜡熟期均表现为迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种单株根表面积比早熟和中熟品种在 2021—2022 年度分别高 39.40%和 26.43%,在 2022—2023 年度分别高 39.12%和 22.84%。根表面积密度在越冬期也表现为迟熟品种显著高于早熟品

种,在返青至蜡熟期均表现为迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种的根表面积密度比早熟和中熟品种在 2021—2022 年度分别高 63.67%和 32.25%,在 2022—2023 年度分别高 60.80%和 28.41%。

2.1.3 单株根体积和根体积比

由图 3 可知,不同熟性小麦品种的单株根体

积和根体积比随生育进程的推进均呈先升后降趋势,且均在开花期达最大值。其中,拔节至开花期是小麦根体积的快速增长期,在此期间单株根体积的增长量在两个生长季节分别占总根体积的36.89%~51.91%、37.46%~49.52%。不同熟性品种的单株根体积在越冬期无显著差异,在返青至蜡熟期均表现为迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种的单株根体积分别比早熟和中熟品种在2021—2022年度高48.60%和33.83%,在2022—2023年度分别高49.27%和33.60%。不同熟性品种的根体积比在越冬期和返青期表现为迟熟品种显著高于早熟品种,在拔节至蜡熟期表现为迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种的根体积比分别比早熟和中熟品种在2021—2022年度高71.61%和31.62%,在2022—2023年度分别高57.73%和27.23%。

2.1.4 单株根干重和根干重密度

由图4可知,不同熟性小麦品种的单株根干重和根干重密度随生育进程的推进均呈先升高后降低的变化趋势,且均在开花期达最大值。返青至开花期单株根干重的增长量在两个生长季节分别占总根干重的67.13%~72.25%和58.10%~65.85%。不同熟性品种的单株根干重在越冬期无显著差异;在返青至蜡熟期迟熟品种显著高于

早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种的单株根干重比早熟和中熟品种在2021—2022年度分别高30.71%和19.46%,在2022—2023年度分别高31.30%和22.17%。不同熟性品种的根干重密度在越冬期差异未达显著水平;在返青至蜡熟期迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种的根干重密度分别比早熟和中熟品种在2021—2022年度高59.22%和23.26%,在2022—2023年度分别高70.60%和32.56%。

2.1.5 开花期不同土层根系形态特征的垂直分布

由表3可知,不同熟性小麦品种的根长密度、根表面积密度、根体积比和根干重密度随土壤深度的增加均呈递减趋势,在0~20 cm土层中最高。0~20 cm土层的根长密度、根表面积密度、根体积比和根干重密度分别占0~100 cm土层各自总量的80.87%~76.93%、75.29%~70.24%、80.49%~76.44%和87.40%~85.95%。同一土层中,迟熟品种的根长密度、根表面积密度、根体积比和根干重密度均显著高于早熟和中熟品种。在0~20 cm土层中,迟熟品种的根长密度分别比早熟和中熟品种高63.35%和34.08%,根表面积密度比早熟和中熟品种分别高59.57%和28.73%,根体积比比早熟和中熟品种分别高58.85%和26.95%,根干重密度比早熟和中熟品种分别高66.01%和28.85%。

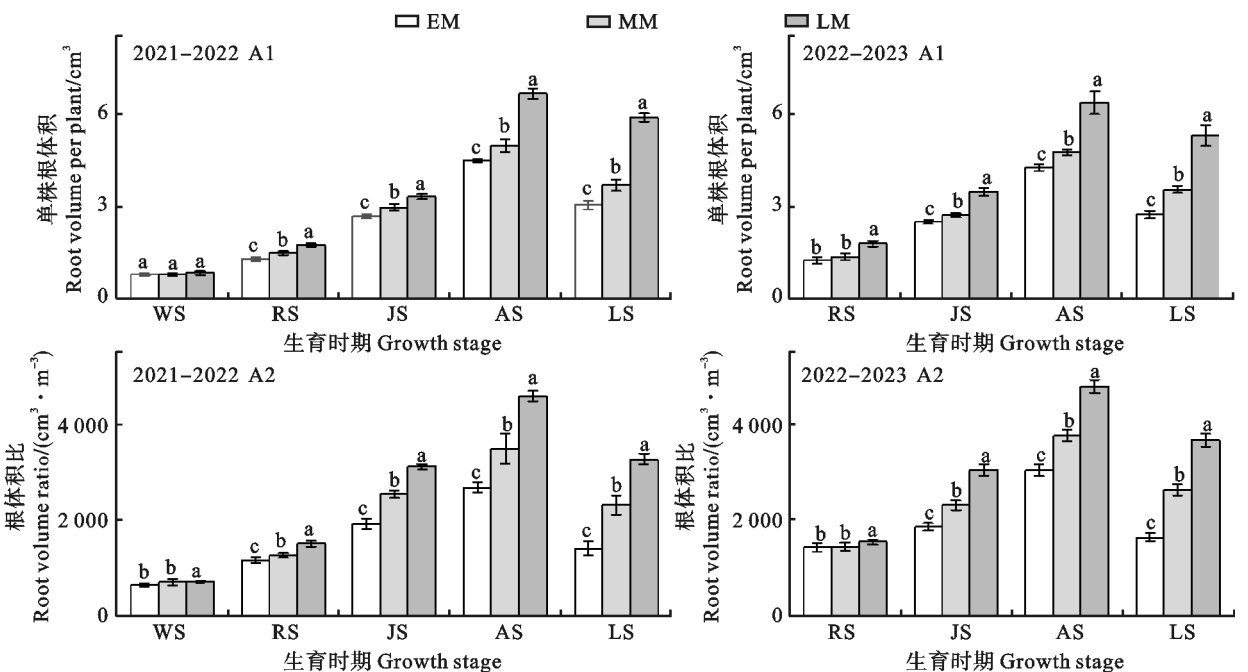


图3 不同熟性小麦品种单株根体积和根体积比动态变化

Fig. 3 Dynamics of root volume per plant and root volume ratio of wheat varieties with different maturity

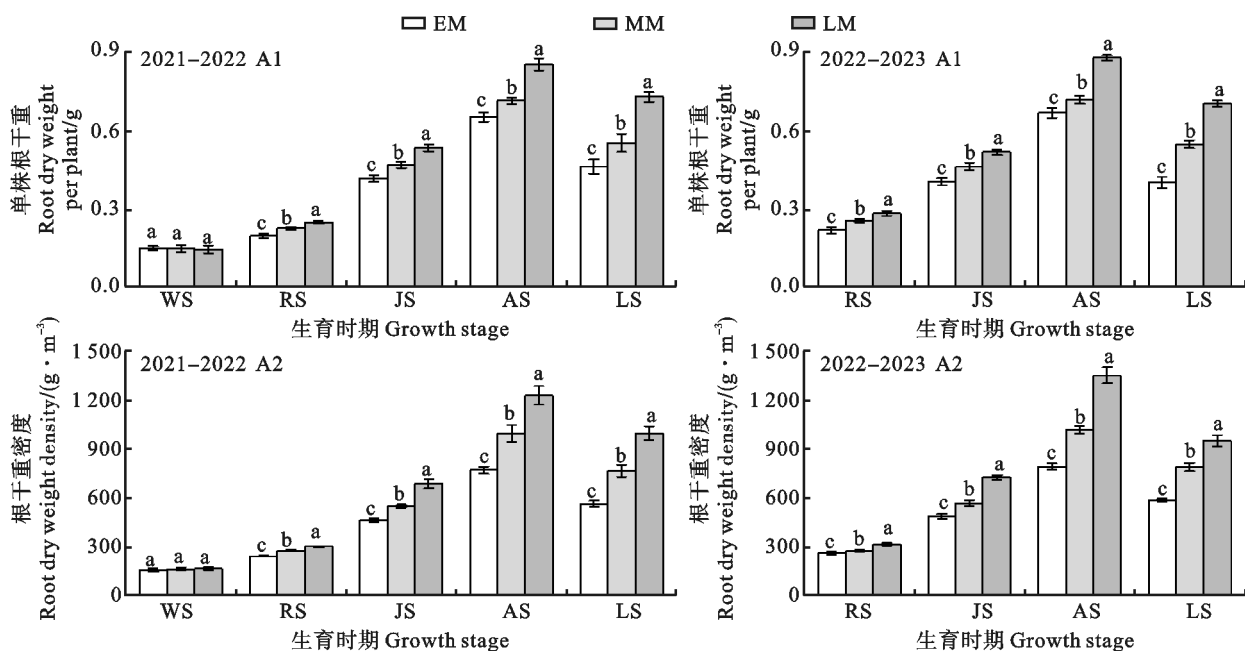


图 4 不同熟性小麦品种单株根干重和根干重密度的动态变化

Fig. 4 Dynamics of root dry weight per plant and root dry weight density of wheat varieties with different maturity

表 3 开花期不同熟性小麦品种不同土层根系形态特征的垂直分布

Table 3 Vertical distribution of root morphological characteristics of wheat varieties with different maturity in different soil layers at anthesis stage

| 土层 Soil layer/cm | 品种 Variety | 根长密度 Root length density/ (cm · cm ⁻³) | 根表面积密度 Root surface area density/(m ² · m ⁻³) | 根体积比 Root volume ratio/ (cm ³ · m ⁻³) | 根干重密度 Root dry weight density/(g · m ⁻³) |
|---------------------|---------------|--|--|--|--|
| 0~20 | EM | 2.71±0.024c | 20.94±0.28c | 2.273±22.8c | 674.7±5.1c |
| | MM | 3.31±0.074b | 25.96±0.36b | 2.844±59.5b | 869.2±10.3b |
| | LM | 4.43±0.027a | 33.41±0.35a | 3.610±38.0a | 1.120.0±9.5a |
| 20~40 | EM | 0.29±0.004c | 2.40±0.03c | 226±2.0c | 39.3±0.5c |
| | MM | 0.36±0.009b | 3.18±0.10b | 266±4.9b | 54.3±0.9b |
| | LM | 0.47±0.006a | 4.36±0.04a | 354±2.9a | 64.4±0.5a |
| 40~60 | EM | 0.20±0.002c | 2.15±0.01c | 172±2.2c | 25.6±0.5c |
| | MM | 0.26±0.006b | 2.68±0.05b | 231±3.5b | 31.6±0.4b |
| | LM | 0.35±0.002a | 3.59±0.04a | 316±3.0a | 37.7±0.3a |
| 60~80 | EM | 0.12±0.002c | 1.58±0.01c | 92±1.5c | 22.5±0.3c |
| | MM | 0.17±0.003b | 1.97±0.04b | 135±2.0b | 26.8±0.2b |
| | LM | 0.24±0.006a | 2.79±0.03a | 209±2.2a | 32.8±0.4a |
| 80~100 | EM | 0.07±0.001c | 1.41±0.01c | 81±1.5c | 17.6±0.3c |
| | MM | 0.08±0.004b | 1.68±0.02b | 133±1.3b | 23.3±0.4b |
| | LM | 0.19±0.003a | 2.03±0.03a | 179±2.7a | 31.6±0.4a |

2.1.6 单株次生根数

由图 5 可知,不同熟性小麦品种的单株次生根数随生育进程的推进均呈先升高后降低的变化趋势,且均在开花期达最大值。其中,返青至开花期是小麦次生根数的快速增长期,在此期间次生根数的增长量在两个生长季节分别占总次生根数

的 66.09%~81.79%和 66.67%~78.57%。不同熟性品种的单株次生根数在越冬期差异未达显著水平,在拔节至蜡熟期表现为迟熟品种显著高于早熟和中熟品种,其中开花期迟熟品种的单株次生根数分别比早熟和中熟品种高 16.73%和 11.73%。

2.2 小麦迟熟品种根系生理特性

2.2.1 根系活力

盆栽和大田试验结果表明,随着生育进程的推进,不同熟性小麦品种的根系活力均呈“高低高低”的变化趋势,在越冬期达峰值,返青期发生下降,拔节期有所升高,之后呈降低趋势,蜡熟期达最低值(图 6)。迟熟品种的根系活力范围为 12.15~71.78 $\mu\text{g TTC} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,在越冬至

蜡熟期均显著高于早熟和中熟品种,其中拔节期增幅分别为 36.39%和 15.02%。

2.2.2 根系抗氧化酶活性及 MDA 含量

不同熟性小麦品种的根系 SOD、POD 和 CAT 活性在开花期显著高于蜡熟期,MDA 含量在开花期显著低于蜡熟期(图 7)。迟熟品种的根系 SOD、POD 和 CAT 活性在开花期和蜡熟期均显著高于早熟和中熟品种。其中,在 2021—2023 年度,迟

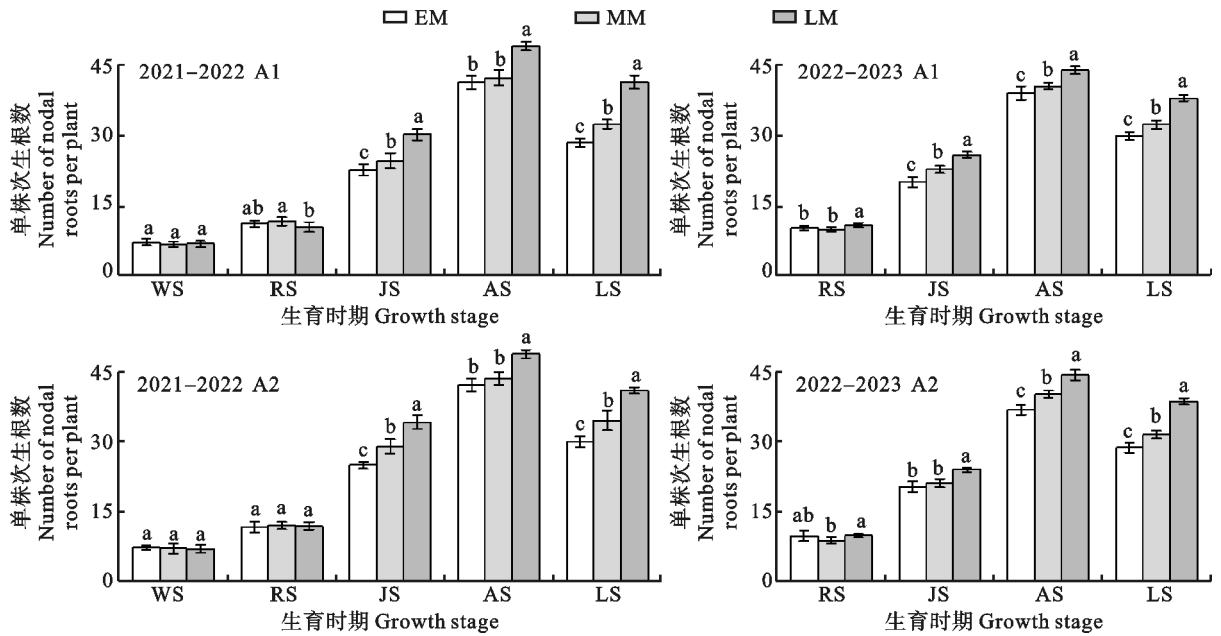


图 5 不同熟性小麦品种单株次生根数的动态变化

Fig. 5 Dynamics of nodal roots per plant of wheat varieties with different maturity

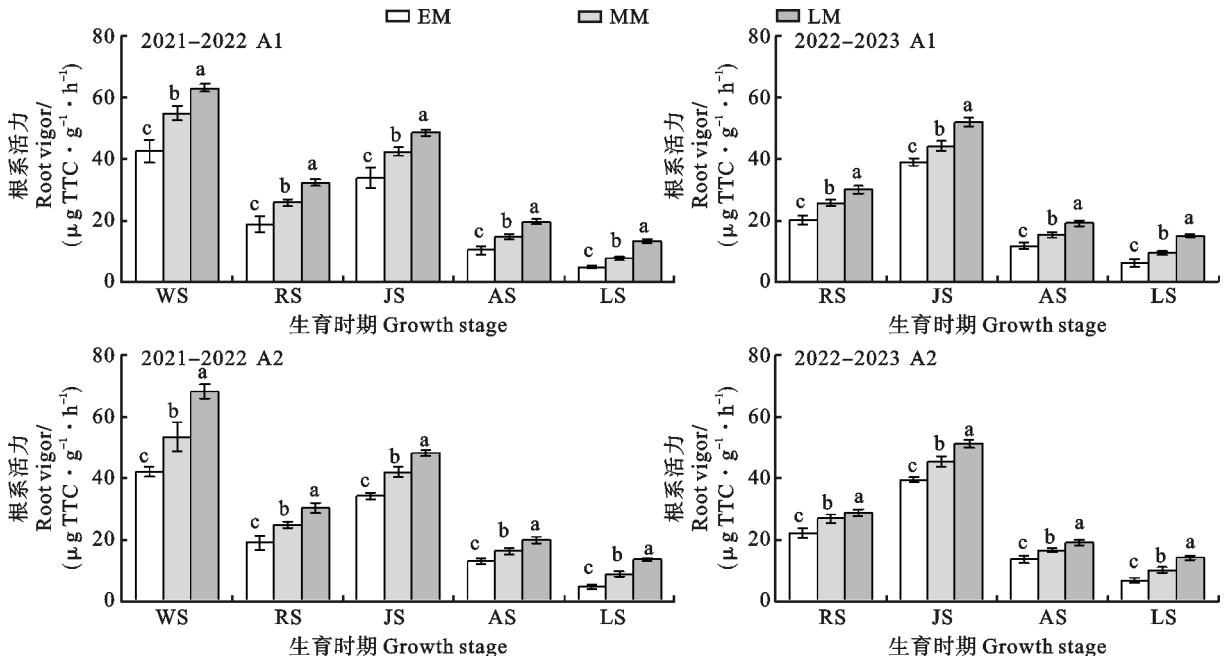


图 6 不同熟性小麦品种根系活力的动态变化

Fig. 6 Dynamics of root vigor of wheat varieties with different maturity

熟品种的 SOD、POD 和 CAT 活性在开花期比早熟品种分别高 25.61%、20.40%和 46.16%，比中熟品种分别高 13.42%、11.16%和 19.52%。同时，迟熟品种的根系 MDA 含量在开花期和蜡熟期均显著低于早熟和中熟品种，在开花期分别比早熟和中熟品种低 23.43%和 9.94%。

2.3 小麦迟熟品种籽粒产量及其构成因素

不同熟性小麦品种的穗数、穗粒数、千粒重及产量均存在显著差异(表 4)。两个试验中，中熟

品种的穗数最高，迟熟品种次之，早熟品种最低；迟熟品种的穗粒数最高，早熟品种次之，中熟品种最低；千粒重表现为迟熟品种最高，早熟品种次之，中熟品种最低；籽粒产量表现为迟熟品种最高，中熟品种次之，早熟品种最低，其中迟熟品种的单株籽粒产量两年平均值分别比早熟和中熟品种高 37.05%和 17.47%，每公顷籽粒产量分别高 29.32%和 18.29%。这说明，迟熟品种主要通过穗粒数和千粒重的增加形成高产。

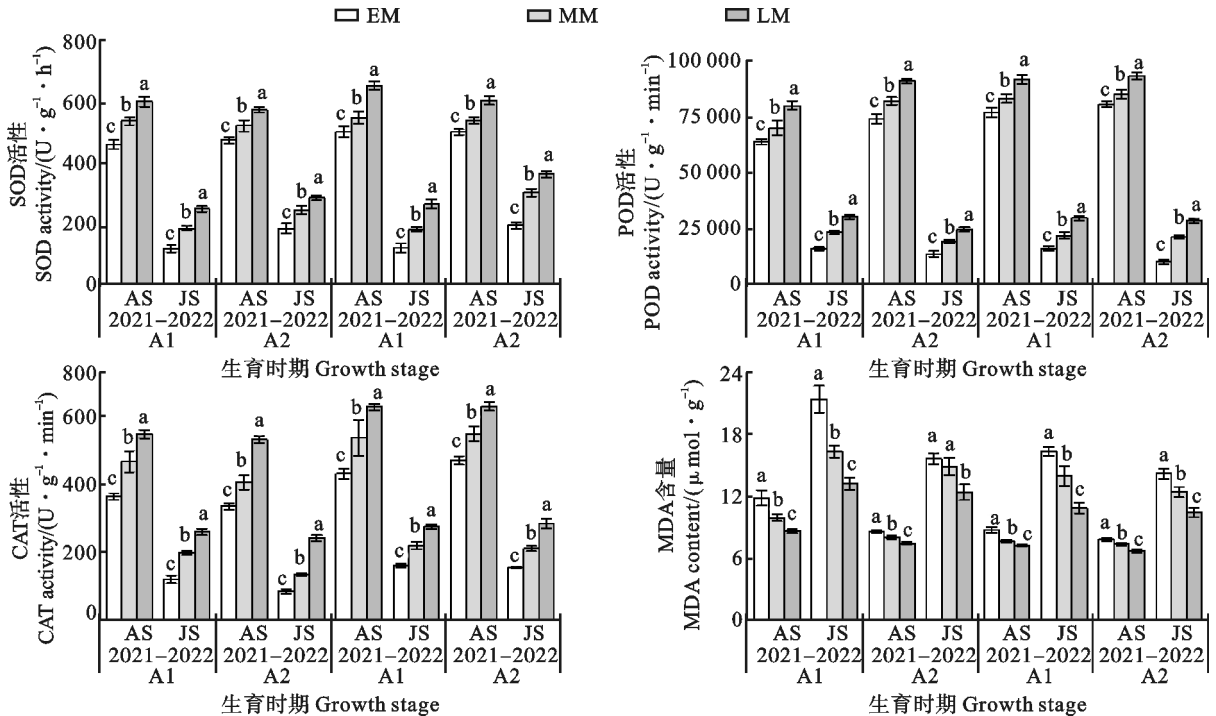


图 7 不同熟性小麦品种根系抗氧化酶活性及 MDA 含量的动态变化

Fig. 7 Dynamics of antioxidant enzyme activity and MDA content in roots of wheat varieties with different maturity

表 4 不同熟性小麦品种籽粒产量及其构成因素

Table 4 Grain yield and its components of wheat varieties with different maturity

| 年度 Year | 熟性 Maturity | A1 | | | | A2 | | | |
|---------------|----------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------|--|
| | | 单株穗数 Spikes per plant | 穗粒数 Grains per spike | 千粒重 1 000-grain weight/g | 单株籽粒产量 Grain yield per plant/g | 穗数 Spikes ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) | 穗粒数 Grains per spike | 千粒重 1 000-grain weight/g | 籽粒产量 Grain yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) |
| 2021— 2022 | EM | 2.87±0.07c | 51.2±0.3a | 53.4±0.3b | 5.84±0.12c | 568±4.2c | 49.1±0.2a | 50.5±0.5b | 7 826±64c |
| | MM | 3.96±0.03a | 45.7±0.2b | 50.6±0.2c | 6.84±0.04b | 828±6.7a | 41.5±0.5c | 44.4±0.2c | 8 559±69b |
| | LM | 3.61±0.02b | 51.7±0.4a | 58.0±0.3a | 8.10±0.07a | 744±9.6b | 45.8±0.3b | 54.1±0.4a | 10 151±66a |
| 2022— 2023 | EM | 2.69±0.03c | 50.9±0.5b | 51.0±0.5b | 5.93±0.10c | 515±6.8c | 48.6±0.3a | 50.2±0.3b | 8 042±38c |
| | MM | 3.65±0.02a | 46.6±0.3c | 46.9±0.3c | 6.89±0.05b | 718±8.5a | 43.2±0.3b | 44.7±0.3c | 8 788±66b |
| | LM | 3.03±0.03b | 56.2±0.5a | 55.8±0.5a | 8.02±0.06a | 641±3.7b | 47.7±0.3a | 53.4±0.2a | 10 369±73a |
| 均值 Mean | EM | 2.78±0.04c | 51.1±0.3b | 52.2±0.4b | 5.88±0.08c | 542±9.1c | 48.8±0.3a | 50.3±0.3b | 7 934±45c |
| | MM | 3.81±0.04a | 46.1±0.2c | 48.7±0.5c | 6.86±0.03b | 773±14.1a | 42.4±0.3b | 44.5±0.2c | 8 674±55b |
| | LM | 3.32±0.07b | 53.9±0.6a | 56.9±0.4a | 8.06±0.05a | 693±9.9b | 46.8±0.2a | 53.7±0.3a | 10 260±55a |

2.4 小麦根系性状与籽粒产量的相关性

在大田和盆栽试验中,小麦根系形态性状与籽粒产量在拔节至蜡熟期均呈极显著正相关($P < 0.01$),且随着生育期的推进,其相关系数逐渐增高。根系活力与籽粒产量间在不同生育时期均

呈极显著正相关(表 5)。开花期根系 SOD、POD、CAT 活性与籽粒产量均呈极显著正相关,而 MDA 含量和根长衰减率与产量均呈极显著负相关(表 6)。这说明通过促进根系发育和延缓其衰老可促进小麦高产。

表 5 不同熟性小麦品种不同生育时期根系性状与籽粒产量的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between root traits and grain yield of different maturity-typed wheat varieties at different growth stages

| 试验 Test | 根系性状 Root trait | 生育时期 Growth stages | | | | | |
|---------|-----------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | WS | RS | JS | AS | GS | LS |
| A1 | RL | 0.362 | 0.796** | 0.777** | 0.936** | 0.947** | 0.928** |
| | RSA | 0.565** | 0.816** | 0.824** | 0.939** | 0.927** | 0.934** |
| | RV | 0.187 | 0.860** | 0.887** | 0.918** | 0.940** | 0.934** |
| | NR | -0.189 | -0.019 | 0.883** | 0.845** | 0.924** | 0.907** |
| | RDW | -0.072 | 0.817** | 0.950** | 0.943** | 0.951** | 0.953** |
| | RVg | 0.952** | 0.955** | 0.920** | 0.946** | 0.940** | 0.947** |
| A2 | RLD | 0.539** | 0.727** | 0.908** | 0.971** | 0.975** | 0.970** |
| | RSAD | 0.388* | 0.597** | 0.942** | 0.960** | 0.946** | 0.976** |
| | RVR | 0.505** | 0.700** | 0.937** | 0.957** | 0.961** | 0.956** |
| | NR | -0.033 | -0.020 | 0.568** | 0.893** | 0.957** | 0.946** |
| | RDWD | 0.396* | 0.919** | 0.974** | 0.963** | 0.979** | 0.943** |
| | RVg | 0.964** | 0.843** | 0.909** | 0.885** | 0.956** | 0.945** |

RL:根长;RSA:根表面积;RV:根体积;NR:次生根数;RDW:根干重;RVg:根系活力;RLD:根长密度;RSAD:根表面积密度;RVR:根体积比;RDWD:根干重密度。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

RL: Root length; RSA: Root surface area; RV: Root volume; NR: Nodal roots; RDW: Root dry weight; RVg: Root vigor; RLD: Root length density; RSAD: Root surface area density; RVR: Root volume ratio; RDWD: Root dry weight density. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表 6 不同熟性小麦品种开花期的根系抗氧化酶活性、MDA 含量和根长衰减率(RLDR)与产量的相关系数
Table 6 Correlation coefficients between antioxidant enzyme activity, MDA content at anthesis, root length decay rate(RLDR), and yield of wheat varieties with different maturity

| 根系性状 Root trait | 籽粒产量 Grain yield | |
|-----------------|------------------|----------|
| | A1 | A2 |
| SOD | 0.935** | 0.893** |
| POD | 0.752** | 0.958** |
| CAT | 0.931** | 0.924** |
| MDA | -0.622** | -0.834** |
| RLDR | -0.858** | -0.889** |

** : $P < 0.01$.

显著影响植物对养分和水分的吸收^[21,22],因此根系的形态特征和生理特性一直是小麦栽培生理和遗传改良研究的重点内容。研究表明,小麦根长、根表面积、根体积、根长密度、根干重密度和次生根数随生育时期的推进均呈先升高后降低的趋势,在开花期均达到最大值^[23,24]。同时,小麦根系主要集中在 0~20 cm 土层,且根系生物量随土壤深度的增加逐渐递减^[25,26]。本研究结果与前人研究相同,数据显示不同熟性小麦品种的根长、根表面积、根体积、根干重、根长密度、根表面积密度、根体积比、根干重密度和次生根数均随着生育时期的推进呈先升高后降低的变化趋势,在开花期达到最大值;且随着土壤深度的增加,根长密度、根表面积密度、根体积比和根干重密度均呈递减趋势,0~20 cm 土层的根长密度、根表面积密度、根体积比和根干重密度均显著高于 20~100 cm 土层。同时,不同基因型小麦品种的根系形态、数量特征均存在显著差异。前人研究表明,抗

3 讨论

3.1 不同熟性小麦品种根系特征特性的差异

植物生长发育所需要的养分和水分主要依靠根系的吸收,而根系的形态特征和生理特性可以

旱性小麦品种具有较高的根干重^[5],氮高效品种具有较高的根表面积和根干重^[6],磷高效品种具有较高的根干重和次生根数^[8],多穗型品种具有较多的次生根,大穗型品种具有较高的根长和根干重^[26]。本研究结果表明,对于不同熟性品种的根系形态特征,迟熟小麦品种根长、根表面积、根体积、根干重、根长密度、根表面积密度、根体积比、根干重密度在返青至蜡熟期均显著高于早熟和中熟品种;且迟熟小麦品种的根长密度、根表面积密度、根体积比、根干重密度在 0~100 cm 土层均显著高于早熟和中熟品种;迟熟小麦品种的单株次生根数在拔节至蜡熟期显著高于早熟和中熟品种。田中伟等^[27]和苗果园等^[28]研究认为,小麦根系在成熟期前就出现了衰亡。本研究结果也显示,开花期后小麦根系发生衰亡,说明根系生长量早于地上部达到高峰,也早于地上部进入衰老。不同熟性品种的根长衰减率表现为早熟品种最大,中熟品种次之,迟熟品种最小。因此,迟熟小麦品种根系发达,拥有较强的发根能力、向深层土壤扩展的能力和较广的根系吸收面积,且在生育后期延迟衰老。

根系活力可以体现根系新陈代谢能力的强弱,是客观反映根系生命活动(包括吸收、合成、呼吸作用和氧化力等)的重要生理指标之一,较高的根系活力有利于促进作物植株的生长发育和产量的形成^[29]。陈昕钰^[30]的研究表明,小麦根系活力在生育期呈先上升后下降的趋势,且分蘖期达到最大值。周燕等^[31]研究发现,小麦根系活力在越冬期和拔节期达到较高水平。本研究中,小麦根系活力在越冬期最高,返青期降低,拔节期出现小高峰后开始下降。不同基因型小麦的根系活力存在显著差异。抗旱性品种^[5]、氮高效品种^[6]、磷高效品种^[8]和大穗型品种^[26]具有较高的根系活力。迟熟品种的根系活力在越冬至蜡熟期均显著高于早熟和中熟品种。

抗氧化酶广泛存在于植物组织内,可清除植物体内的活性氧自由基(ROS),减少细胞膜结构和功能的破坏,在延缓器官衰老、延长光合作用和抵御逆境胁迫方面发挥重要作用。同时,在作物衰老的过程中,随着植物体内活性氧的不断累积,氧化还原反应遭到破坏,形成膜脂过氧化产物 MDA,而 MDA 的含量随植株衰老而增加,即膜脂过氧化增强。本研究结果表明,根中 SOD、POD 和 CAT 活性在开花至蜡熟期均呈下降趋

势,MDA 含量在开花至蜡熟期呈上升趋势,且迟熟品种的 SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于早熟和中熟品种,MDA 含量显著低于早熟和中熟品种。相关分析结果表明,根长衰减率与 SOD、POD 和 CAT 活性均呈极显著负相关,与 MDA 含量呈极显著正相关。这说明迟熟品种具有较高的抗氧化酶活性和较低的膜脂过氧化程度,因此可以延缓根系衰老,有助于功能期延长。

3.2 小麦根系生长发育与籽粒产量形成的关系

作物根系形态特征与产量形成密切相关^[32]。高产品种往往根系发达、发根力强、根数多、扎根深,后期吸收面积广、吸收能力强^[11,12]。田中伟等^[27]研究表明,小麦开花期根长、表面积、根干重和 0~60 cm 根干重密度与籽粒产量均呈显著正相关。葛雨洋等^[33]研究发现,小麦成熟期 0~100 cm 土层根干重较高的品种产量也较高。本研究中,根长、根表面积、根体积、单株次生根数、根干重、根长密度、根表面积密度、根体积比、根干重密度在拔节至蜡熟期整体与产量均呈极显著正相关,与前人研究结果基本一致。迟熟品种的根长、根表面积、根体积、单株次生根数、根干重均显著高于早熟和晚熟品种,故迟熟品种的籽粒产量显著高于早熟和晚熟品种。

根系生理特性也与产量形成密切相关。高产品种还具有后期根系活力高、衰老较晚且缓慢等特点^[11,12]。研究表明,小麦根系活力与产量呈极显著正相关,相关系数达 0.9 以上^[34]。严美玲等^[35]研究认为,高产高效小麦品种开花期和灌浆期 0~40 cm 土层根系 SOD 活性较高,根系 MDA 含量较低,根系衰老缓慢。本试验结果显示,小麦根系活力在整个生育期均与产量呈极显著的正相关,开花期根系 SOD、POD 和 CAT 活性与产量均呈极显著正相关,根系 MDA 含量、衰减率与产量均呈极显著负相关,与前人研究结果基本一致。迟熟品种的根系活力、SOD、POD 和 CAT 活性均显著高于早熟和晚熟品种,迟熟品种的根系 MDA 含量、衰减率均显著低于早熟和晚熟品种,故迟熟品种的籽粒产量显著高于早熟和晚熟品种。Cristina 等^[36]研究认为,通过品种改良或栽培技术手段延缓根系衰老和提高根系生理活性,可有效提高小麦产量。因此,提高根系生理活性、延缓根系衰老可以作为小麦高产高效栽培的重要调控途径。

从产量构成来看,迟熟品种产量较高的原因

是其具有较高的穗粒数和千粒重。返青至拔节期是小麦穗粒数形成的关键时期,在此期间,与早熟和中熟品种相比,迟熟小麦品种拥有更强大的根系,有利于穗粒数的形成。千粒重取决于花前干物质积累和花后地上部光合作用。由于迟熟品种拥有更强大的根系,推测其花前干物质积累量更大,花后地上部光合作用也更高,从而促进千粒重的增加。故拥有更高穗粒数和更高千粒重的迟熟品种的籽粒产量最高。然而,为应对小麦生长后期干热风等灾害性天气频繁出现的气候特点、提高复种指数、充分利用光热资源、增加周年粮食产量,早中熟小麦品种是中国大多数地区的育种目标和应用品种^[37-39]。但与晚熟品种相比,早熟品种通常产量较低。因此,在小麦生长后期气候因素较好的地区且轮作复种季节允许的条件下,应优先选育和种植迟熟小麦品种。

4 结论

与早熟和中熟品种相比,迟熟小麦品种次生根数较多,根长较长,根干重、根表面积和根体积较大,根系活力和抗衰老能力较强,建议在时间允许条件下在生产中推广应用,以充分发挥其高产潜力,在时间偏紧条件下则需考虑周年协调生产。

参考文献:

- [1] 马元喜. 小麦的根[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
MA Y X. Wheat root [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [2] HAMMER G L, DONG Z, MCLEAN G, *et al.* Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U. S. corn belt? [J]. *Crop Science*, 2009, 49(1): 299.
- [3] NAKHFOROOSH A, NAGEL K A, FIORANI F, *et al.* Deep soil exploration *vs.* topsoil exploitation: Distinctive rooting strategies between wheat landraces and wild relatives [J]. *Plant and Soil*, 2021, 459(1): 397.
- [4] LI P F, MA B L, PALTA J A, *et al.* Distinctive root system adaptation of ploidy wheats to water stress: A cue to yield enhancement [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2023, 209(4): 566.
- [5] 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.
- [6] 熊淑萍, 吴克远, 王小纯, 等. 不同氮效率基因型小麦根系吸收特性与氮素利用差异的分析[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(12): 2267.
XIONG S P, WU K Y, WANG X C, *et al.* Analysis of root absorption characteristics and nitrogen utilization of wheat genotypes with different N efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(12): 2267.
- [7] 海闾北, 彭超军, 李艳, 等. 高氮与低氮处理对不同氮效率小麦根系及相关生理特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(6): 697.
HAI C B, PENG C J, LI Y, *et al.* Effect of high and low nitrogen treatments on roots and related physiological characteristics of wheat with different nitrogen efficiency [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(6): 697.
- [8] 李宾兴, 郭程瑾, 王斌, 等. 缺磷胁迫下不同磷效率小麦品种及其杂种 F₁ 的磷吸收利用特性[J]. *作物学报*, 2006, 32(2): 267.
LI B X, GUO C J, WANG B, *et al.* Acquisition and utilization characteristics of phosphorus in hybrid F₁ and parents with different P efficiencies under phosphorus deficient condition [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 267.
- [9] 王金艳, 李金峰, 李林峰, 等. 2017—2022 年焦作小麦区域试验品种主要农艺性状及产量分析[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(4): 1038.
WANG J Y, LI J F, LI L F, *et al.* Analysis of main agronomic traits and yield of tested wheat varieties in regional experiment in Jiaozuo during 2017—2022 [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2023, 54(4): 1038.
- [10] REYNOLDS M, FOULKES M J, SLAFER G A, *et al.* Raising yield potential in wheat [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(7): 1899.
- [11] XUE Y F, ZHANG W, LIU D Y, *et al.* Effects of nitrogen management on root morphology and zinc translocation from root to shoot of winter wheat in the field [J]. *Field Crops Research*, 2014, 161: 38.
- [12] SGHERRI C, QUARTACCI M F, NAVARI-IZZO F. Early production of activated oxygen species in root apoplast of wheat following copper excess [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(9): 1152.
- [13] 滕政凯, 王春艳, 卜明娜, 等. 抗旱小麦品种根系垂直分布和根尖特征分析研究[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(9): 1172.
TENG Z K, WANG C Y, BU M N, *et al.* A analytical study on the vertical distribution of root and the characteristics root tips of drought-resistant wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(9): 1172.
- [14] 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): 2296.
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): 2296.
- [15] 王小兵, 史红飞, 李元清, 等. 不同熟期春小麦品种光合速率日变化研究[J]. *内蒙古农业科技*, 2015, 43(4): 12.
WANG X B, SHI H F, LI Y Q, *et al.* Study on diurnal variation of photosynthetic rates for different maturity period of spring wheat varieties [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2015, 43(4): 12.
- [16] 张利, 隋新霞, 王羽, 等. 不同熟性小麦品种的干物质积累和分配规律[J]. *山东农业科学*, 2007, 39(6): 54.
ZHANG L, SUI X X, WANG Y, *et al.* Dry matter accumulation and assignment rule of wheat cultivars with different maturity [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2007, 39(6): 54.
- [17] 孙花, 柴守玺, 刘小娥, 等. 不同熟期小麦籽粒灌浆特性的研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2009, 44(6): 12.
SUN H, CHAI S X, LIU X E, *et al.* Studies on grain filling characteristics in different maturity type wheat [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2009, 44(6): 12.
- [18] 张玉芹, 杨恒山, 张瑞富, 等. 浅埋滴灌下水氮运筹对春玉米根系衰减特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49(11): 3074.
ZHANG Y Q, YANG H S, ZHANG R F, *et al.* Effects of

- water and nitrogen application on root attenuation characteristics and yield of spring maize under shallow buried drip irrigation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(11):3074.
- [19] 孙燕, 刘韵, 王全九, 等. 三种浸种剂对 Na_2SO_4 胁迫下小麦种子萌发期耐盐性的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(1): 101.
SUN Y, LIU Y, WANG Q J, *et al.* Effects of different soaking agents on salt tolerance of wheat seeds during germination under Na_2SO_4 stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1):101.
- [20] 李金鹏, 黄敬尧, 李中蔚, 等. 不同耕作和施氮模式对淮北区小麦干物质积累、产量及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(2):195.
LI J P, HUANG J Y, LI Z W, *et al.* Effects of different tillage and nitrogen application patterns on dry matter accumulation, yield and water use efficiency of wheat in Huaibei Region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(2):195.
- [21] 李春俭, 马玮, 张福锁. 根际对话及其对植物生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1):178.
LI C J, MA W, ZHANG F S. Rhizosphere talk and its impacts on plant growth [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1):178.
- [22] 陈伟, 薛立. 根系间的相互作用: 竞争与互利[J]. 生态学报, 2004, 24(6):1243.
CHEN W, XUE L. Root interactions: Competition and facilitation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6):1243.
- [23] 熊淑萍, 王小纯, 李春明, 等. 冬小麦根系时空分布动态及产量对不同氮源配施的响应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 759.
XIONG S P, WANG X C, LI C M, *et al.* Responses of the spatial-temporal distribution of winter wheat (*Triticum aestivum*) roots and yield to different ratios of nitrogen sources [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(7):759.
- [24] 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):225.
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):225.
- [25] 王永华, 王玉杰, 冯伟, 等. 两种气候年型下不同栽培模式对冬小麦根系时空分布及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14):2826.
WANG Y H, WANG Y J, FENG W, *et al.* Effects of different cultivation patterns on the spatial-temporal distribution characteristics of roots and grain yield of winter wheat in two climatic years [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14):2826.
- [26] 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):778.
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):778.
- [27] 田中伟, 樊永惠, 殷美, 等. 长江中下游小麦品种根系改良特征及其与产量的关系[J]. 作物学报, 2015, 41(4):613.
TIAN Z W, FAN Y H, YIN M, *et al.* Genetic improvement of root growth and its relationship with grain yield of wheat cultivars in the Middle-Lower Yangtze River [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4):613.
- [28] 苗果园, 张云亭, 尹钧, 等. 黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究[J]. 作物学报, 1989, 15(2):104.
MIAO G Y, ZHANG Y T, YIN J, *et al.* A study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid Loess Plateau [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1989, 15(2):104.
- [29] LIU H, FU X. Phytohormonal networks facilitate plant root developmental adaptations to environmental changes [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(6):709.
- [30] 陈昕钰. 小麦根系的生长发育及其对氮素和干旱的响应机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
CHEN X Y. Studies on root growth and development of wheat and its response mechanism to nitrogen and drought [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [31] 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):2060.
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):2060.
- [32] FANG Y, DU Y, WANG J, *et al.* Moderate drought stress affected root growth and grain yield in old, modern and newly released cultivars of winter wheat [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8:672.
- [33] 葛雨洋, 王美玲, 蒋文月, 等. 孕穗期渍水对不同小麦品种根系生长和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(9): 1187.
GE Y Y, WANG M L, JIANG W Y, *et al.* Effects of waterlogging at booting stage on root growth and grain yield of different wheat cultivars [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(9):1187.
- [34] 黄国勤, 黄小洋, 张兆飞, 等. 免耕对水稻根系活力和产量性状的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(5):170.
HUANG G Q, HUANG X Y, ZHANG Z F, *et al.* Effect of No-tillage on the root activity and yield characters in rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5):170.
- [35] 严美玲, 郑雪娇, 石玉, 等. 不同产量潜力小麦品种干物质积累转运及根系衰老差异分析[J]. 山东农业科学, 2023, 55(6):47.
YAN M L, ZHENG X J, SHI Y, *et al.* Difference analysis of dry matter accumulation and transport and root senescence of wheat varieties with different yield potential [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(6):47.
- [36] SGHERRI C, QUARTACCI M F, NAVARI-IZZO F. Early production of activated oxygen species in root apoplast of wheat following copper excess [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(9):1152.
- [37] 张灿军, 高海涛, 段国辉, 等. 高产早熟小麦新品种洛麦 24 的选育[J]. 种子, 2018, 37(9):108.
ZHANG C J, GAO H T, DUAN G H, *et al.* Breeding of new high yield and early maturing wheat new variety Luomai 24 [J]. *Seed*, 2018, 37(9):108.
- [38] 安浩军, 李亚敏, 狄继革, 等. 小麦早熟高产品种产量形成特性的分析[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5):37.
AN H J, LI Y M, DI J G, *et al.* Analysis on yield formation properties in early maturing and high grain yield wheat cultivars [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(5):37.
- [39] 张利, 隋新霞, 王羽, 等. 小麦早熟新品种 K35 的阶段发育与灌浆特性[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(5):884.
ZHANG L, SUI X X, WANG Y, *et al.* Phase development and grain filling characteristics of different mature wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(5):884.