

网络出版时间: 2026-06-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260609.1025.006>

河南省不同年代小麦品种根系生理功能及其与产量性状相关性的演进特征

贾晓雯¹, 张紫俊¹, 胡乃月¹, 宋晓², 王洁¹, 陈旭¹, 于梦娇¹,
魏婷婷¹, 马耕¹, 周苏玫¹, 贺德先¹, 杨习文¹

(1. 河南农业大学农学院/小麦玉米两熟高效生产全国重点实验室/国家小麦工程技术研究中心/河南粮食作物协同创新中心, 河南郑州 450046; 2. 河南省农业科学院, 河南郑州 450099)

摘要:为探究河南省不同年代小麦品种根系生理功能及其与产量性状相关性的演进特征,以河南省1950年代至2010年代的28个代表性小麦品种为材料,按每10年划分为1个年代组,共分为7个年代,于2023—2025年开展室外盆栽试验。系统测定了小麦不同生育时期的根干重、根系活力、根中全氮含量、根中可溶性糖含量,并调查了产量性状。结果表明,随年代更替,1970—2010年代品种根干重较1950—1960年代下降13.0%,生育期内呈先增加后减少并趋于稳定的趋势;根冠比呈现同样的变化趋势,1970—2010年代品种根冠比较1950—1960年代平均降低14.0%,2010年代品种较1950年代降低20.0%;1980—2010年代品种根系活力较1950—1970年代品种在整个生育期内更稳定,且在生育后期下降速率减缓且活力相对较高;根中全氮含量与可溶性糖含量持续升高,均在2010年代达峰值,较1950年代分别提升25.7%和25.6%,生育期内峰值均在返青期;2010年代品种较1950年代品种单株产量提升了56.2%,产量构成要素中,单株穗数下降了29.7%,千粒重增加了56.2%,穗粒数增加了3.9%。经相关分析,返青期根系活力和根中全氮含量与千粒重均呈极显著正相关;拔节期根中可溶性糖含量与单株穗数呈极显著正相关,而与千粒重呈极显著负相关。总之,随着年代更替,河南小麦根干重及根冠比呈下降趋势,产量持续提升,植株干物质更多地分配于产量形成;根系活力随年代更替先升后降,1980年代达到峰值;根中全氮含量及可溶性糖含量随年代的推进呈现出明显的增加趋势。

关键词:小麦;根系;生理功能;相关性;演进特征

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)07-0925-10

Evolutionary Characteristics of Root Physiological Functions of Wheat Varieties in Different Decades in Henan Province and Their Correlation with Yield Traits

JIA Xiaowen¹, ZHANG Zijun¹, HU Naiyue¹, SONG Xiao², WANG Jie¹, CHEN Xu¹, YU Mengjiao¹,
WEI Tingting¹, MA Geng¹, ZHOU Sumei¹, HE Dexian¹, YANG Xiwen¹

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University/State Key Laboratory of High-Efficiency Production of Wheat-Maize Double Cropping/National Engineering Research Center for Wheat/Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450099, China)

Abstract: To explore the evolutionary characteristics of root physiological functions and their correlations with yield traits in wheat varieties from different decades in Henan Province, 28 representative varieties from the 1950s to the 2010s were used as materials. The varieties were grouped into seven decades. The study was conducted using outdoor pot experiments from 2023 to 2025. The root dry

收稿日期: 2026-01-28

修回日期: 2026-03-08

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2022YFD2300802); 国家自然科学基金项目(32301944)

第一作者 E-mail: jxw170629@163.com(贾晓雯)

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

weight, root vigor, total nitrogen, and soluble sugar content in roots at different growth stages were systematically determined, and the yield traits were investigated. The results showed that, with the passage of time, the root dry weight of varieties from the 1970s to the 2010s decreased by 13.0% compared with that from 1950s to 1960s, showed a trend of increasing first and then decreasing and eventual stabilization during the growth period. The root-shoot ratio showed the same changing trend as the root dry weight the root-shoot ratios of varieties from the 1970s to the 2010s decreased by an average of 14.0% compared with those of the 1950s to the 1960s, and those of varieties from the 2010s decreased by 20.0% compared with the 1950s. The root vigor of the varieties from 1980 to 2010 was more stable throughout the growth period compared with that of the varieties from 1950s to 1970s, and its decline slowed down in the later growth period remained a high level. The total nitrogen and soluble sugar content in roots continued to increase, both reaching their peaks in the varieties in the 2010s, with increase rate of 25.7% and 25.6% respectively compared with the 1950s, and the peak values for both indicators occurred at the regreening stage. The yield per plant of the varieties in the 2010s increased by 56.2% compared with those in the 1950s, among the yield components, the number of panicles per plant decreased by 29.7%; the thousand-grain weight increased by 52.6%, and the number of grains per panicle increased by 3.9%. The results of the correlation analysis showed that wheat root vigor and total nitrogen concentration at regreening stage were highly significantly positively correlated with the thousand-grain weight, while soluble sugar content was positively correlated with the number of panicles per plant but negatively correlated with the thousand-grain weight during the jointing period. In summary, with the passage of time, the root dry weight and root-shoot ratio of wheat have shown a downward trend in Henan; plant dry matter was allocated more to yield formation; root vigor exhibits a temporal pattern of initial increase followed by decrease, peaking in the 1980s; the total nitrogen and soluble sugar content in roots showed an increasing trend with the advancement of release decades.

Keywords: Wheat; Root system; Physiological function; Correlation; Evolution characteristics

根系是小麦重要的功能器官,在固定植株、吸收水分和养分以及调节内源激素运输等方面发挥着重要作用^[1],其生理状态与地上部生长发育及产量形成密切相关^[2]。根系干物质积累量、根系活力、氮含量和可溶性糖含量是表征根系生理功能的重要指标^[3]。其中,根系干物质积累量大有助于扩大吸收面积,提高水肥利用效率^[4];根系氮含量可在一定程度上反映植株氮素吸收与转运能力,并与籽粒蛋白质形成密切相关^[5];可溶性糖含量则反映根系碳代谢水平,其动态变化与小麦抗逆性及产量形成关系密切^[6]。因此,明确小麦根系生理功能的演变规律,对其高产高效栽培与品种改良具有重要意义。

20世纪50年代以来,河南省小麦生产经历了多轮品种更替,先后形成了一批适应不同生产条件的主栽品种^[7],这些品种在产量、品质、抗逆性等方面均得到明显改良^[8]。长期以来,小麦品种改良与生理机制研究主要聚焦于地上部产量构

成及其相关生理特性^[9]。围绕产量三因素协同优化、株高矮化与抗倒伏增强、花后光合效率提升及叶面积指数动态调控等方面,相关研究已形成较为系统的认识,并表明地上部性状改良是推动小麦产量提升的重要途径^[10-12]。针对河南省及黄淮海区,已有研究进一步围绕地上部性状展开深入分析,包括不同年代小麦品种净光合作用、气孔导度等生理指标遗传增益的量化研究^[13],穗部光合作用对籽粒产量贡献的长期研究^[14],以及不同年代品种产量及相关性状演变规律的系统梳理^[15]。相比之下,关于地下部根系生理功能的研究仍相对不足。从研究历程来看,全球范围内针对不同年代小麦品种根系形态生理特征的系统研究直至近年才逐步开展^[16-17],而中国相关研究仍显薄弱。现有研究虽已指出小麦根系对地上部生长和产量形成具有重要影响^[18],但针对小麦品种年代演进过程中根系生理功能,如根系活力、干重、氮素积累和糖代谢等的系统解析仍较为缺乏^[19-20]。秦晓

梁等^[12]针对黄淮海冬小麦 1948—2012 年品种的研究虽涉及根系性状,但未深入解析其生理功能的年代演变机制;张立桢等^[21]研究发现,现代小麦品种在氮素利用效率上优于老品种,但未深入解析根系生理的贡献;周燕等^[22]指出根系活力与小麦产量存在显著正相关,但缺乏不同年代品种的比较;李爱国等^[23]总结了河南省小麦品种的更替历程,对于根系生理功能的研究有限。

因此,本研究选取河南省不同年代主栽小麦品种,系统分析根系活力、干重、氮含量及可溶性糖含量的动态变化及其与产量形成的关系,旨在

揭示河南省小麦品种更替过程中根系生理功能的演变规律,为小麦高产栽培与品种改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选取河南省 1950 年代、1960 年代、1970 年代、1980 年代、1990 年代、2000 年代和 2010 年代 7 个年代共 28 个代表性主栽小麦品种作为供试材料,具体品种见表 1。供试种子均由河南省农业科学院小麦研究所提供。

表 1 河南省不同年代供试小麦品种
Table 1 Wheat varieties used in this study from different decades in Henan Province

应用年代 Release decade	品种名称 Variety name
1950s	蚂蚱麦、蚰子麦、望水白、西农 6028 Mazhamai, Youzimai, Wangshuibai, Xinong 6028
1960s	阿夫、北京 8 号、内乡 36、内乡 5 号 Afu, Beijing 8, Neixiang 36, Neixiang 5
1970s	宛 7107、召麦 2 号、昌乐 5 号、郑州 761 Wan 7107, Zhaomai 2, Changle 5, Zhengzhou 761
1980s	百农 3217、陕农 7859、豫麦 2 号、豫麦 7 号 Bainong 3217, Shanong 7859, Yumai 2, Yumai 7
1990s	豫麦 18 号、豫麦 13 号、豫麦 21 号、豫麦 49 号 Yumai 18, Yumai 13, Yumai 21, Yumai 49
2000s	郑麦 9023、郑麦 366、郑丰 5 号、郑 9962 Zhengmai 9023, Zhengmai 366, Zhengfeng 5, Zheng 9962
2010s	郑麦 7698、百农 207、郑麦 379、郑麦 1860 Zhengmai 7698, Bainong 207, Zhengmai 379, Zhengmai 1860

1.2 试验设计

试验于 2023—2025 年在河南农业大学科教园区原阳基地进行盆栽试验。盆栽容器选用底部带排水孔的 PVC 盆,盆口直径 28 cm,高 30 cm。试验土壤取自该基地前茬为大豆的田块 0~20 cm 耕层土壤,土壤基础养分状况:有机质含量 13.6 g·kg⁻¹,全氮含量 1.25 g·kg⁻¹,碱解氮含量 81.8 mg·kg⁻¹,有效磷含量 26.8 mg·kg⁻¹,速效钾含量 110.5 mg·kg⁻¹,pH 值 7.7。

土壤风干后过 3 mm 筛,每盆装土 15 kg。每盆分别施纯 N 1.6 g、P₂O₅ 0.8 g 和 K₂O 0.8 g,所用肥料分别为尿素、重过磷酸钙和氯化钾。磷肥和钾肥全部作基肥一次施入,氮肥按基肥和追肥 1:1 施用,追肥时期为拔节期。播种前灌水,使土壤含水量保持在 70%~80%。每盆播种 15 粒,三叶期每盆留生长一致的植株 10 株。试验共设 28 个品种,每个品种 3 个重复,并按越冬期、返青期、拔节期、抽穗期和成熟期 5 个取样时期分别设置盆栽,共 420 盆。盆栽管理期间根据天气和

土壤墒情进行补水,在连续无降水条件下每隔 10 d 浇水 1 次,每盆灌水 800 mL。其他管理参照河南省小麦高产栽培措施进行,并统一进行病虫害防治和盆栽位置调整,以减少非试验因素干扰。

1.3 测定项目与方法

分别于越冬期、返青期、拔节期、抽穗期和成熟期取样。每个品种每次取 3 盆,每盆选取 3 株长势一致、无病虫害的植株,小心挖取用清水冲洗根系,去除附着泥土和杂质。采用烘干称重法测定地上部干重和根干重。在茎基部将植株分为地上部和根系两部分。根系样品洗净后用滤纸吸干表面水分,105 ℃烘 30 min 后,于 75 ℃烘至恒重,分别测定地上部干重(W_S)和根系干重(W_R)。根冠比=W_R/W_S。采用改良氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定根系活力^[24]。将各时期所取植株根系样品烘干、粉碎并过筛后备用。采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[25]。成熟期每个品种取 3 盆计产,共 30 株。统计穗数、穗粒数,并测定千粒重。

1.4 统计分析方法

采用 Excel 2010 和 Origin 2024 进行数据整理与图表绘制;运用 SPSS 27 软件进行单因素方差分析(ANOVA),并采用 Duncan 多重比较法检验组间差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 河南省不同年代小麦品种根干重及根冠比的演进特征

根干重随年代更替呈先增后减的规律(表 2),在 1960 年代达峰值,且与多数年代品种存在显著差异($P<0.05$)。与 1950—1960 年代相比,1970—2010 年代品种根干重总体呈下降趋势,平均降低了 13.0%;2010 年代品种较 1950 年代降低了 17.0%。随着生育期的推进,根系干重先增加后减少,抽穗期达到峰值,平均较成熟期高出 14.8%,两年变化趋势基本一致。

随年代更替,根冠比同样呈现先增加后减少的规律,不同年代间差异达显著水平,其中 1970—2010 年代品种根冠比较 1950—1960 年代平均降低约 14.0%,2010 年代品种较 1950 年代降低约 20.0%,两年试验结果总体一致,且 2025 年根干重整体高于 2024 年。这说明河南省小麦品种在演变过程中,根干重及根冠比在 1950—1960 年代相对较高,而 1970 年代以后则呈下降趋势。

2.2 河南省不同年代小麦品种根系活力的演进特征

不同年代小麦品种在各生育时期的根系活力

存在明显差异(表 3)。总体上,1950—1980 年代间的根系活力呈持续上升趋势,1980 年代品种在不同生育时期均达到峰值,均显著高于 1950—1970 年代品种($P<0.05$),较 1950 年代提高 53.8%;1980—2010 年代的根系活力呈下降趋势,但 2010 年代品种的各生育期活力仍显著高于 1950—1960 年代品种($P<0.05$),如 2010 年代拔节期活力较 1950 年代提升 35.0%,成熟期活力较 1950 年代提升 7.9%。从整个生育期看,根系活力呈现先升高后降低的趋势,在拔节期达到峰值,两年的变化趋势一致。综合来看,河南省小麦品种的根系活力随年代的更替呈现出先升高后降低的变化趋势,其中 1980 年代品种表现最优。

2.3 河南省不同年代小麦品种根中全氮含量的动态变化

不同年代小麦品种根中全氮含量在各生育时期存在明显差异(表 4)。总体上,两年试验结果变化趋势基本一致,随年代更替,根中全氮含量整体表现为增加趋势。其中,1960—1980 年代品种平均较 1950 年代增加了 7.4%,1990—2010 年代品种平均较 1960—1980 年代增加 13.5%,2010 年代品种较 1950 年代增加了 25.7%。随生育进程的推进,不同年代品种根中全氮含量均呈现出先升高后降低的变化趋势,在返青期达到峰值,成熟期最低,1950 年代品种成熟期较返青期减少 55.1%,1960—1980 年代减少 51.8%,1990—2010 年代减少 48.0%。

表 2 河南省不同年代小麦品种不同生育时期根干重及根冠比
Table 2 Root dry weight and root-shoot ratio at different growth stages of wheat varieties from different decades in Henan

年份 Year	年代 Decades	单株根干重 Root dry weight per plant/g					根冠比 Root-shoot ratio				
		WS	RS	JS	HS	MS	WS	RS	JS	HS	MS
2024	1950	0.09b	0.22b	0.48ab	0.82b	0.73b	0.17a	0.23ab	0.19a	0.06a	0.14a
	1960	0.10a	0.23a	0.50a	0.86a	0.75a	0.17a	0.23a	0.19a	0.07a	0.15b
	1970	0.08cd	0.18d	0.44abc	0.75b	0.70b	0.17bc	0.22ab	0.19b	0.05b	0.13b
	1980	0.08c	0.21c	0.45abc	0.76b	0.71b	0.17b	0.23ab	0.19b	0.05b	0.14b
	1990	0.07d	0.18d	0.43bcd	0.73b	0.65b	0.17bc	0.22ab	0.19b	0.05b	0.13b
	2000	0.07e	0.17e	0.41cd	0.72b	0.63b	0.16c	0.22ab	0.19b	0.05b	0.13b
	2010	0.06e	0.16e	0.38d	0.72b	0.62b	0.16c	0.23b	0.18b	0.05b	0.13b
2025	1950	0.14b	0.22b	0.56a	1.02ab	0.89a	0.19a	0.14ab	0.17a	0.12a	0.21a
	1960	0.17a	0.23a	0.58a	1.07a	0.92a	0.18a	0.13a	0.15a	0.12a	0.19b
	1970	0.16cd	0.21d	0.53b	0.95bc	0.80bc	0.18bc	0.11ab	0.14b	0.10b	0.17b
	1980	0.16c	0.21c	0.54b	0.95bc	0.85ab	0.16b	0.11ab	0.15b	0.10b	0.18b
	1990	0.15d	0.18d	0.52b	0.93bc	0.78bc	0.13bc	0.09ab	0.13b	0.10b	0.15b
	2000	0.13e	0.19e	0.51b	0.91c	0.76c	0.14c	0.08ab	0.11b	0.09b	0.13b
	2010	0.12e	0.18e	0.51b	0.92c	0.75c	0.14c	0.08b	0.10b	0.10b	0.13b

WS:越冬期;RS:返青期;JS:拔节期;HS:抽穗期;MS:成熟期。相同年份同列数据后不同字母表示品种间差异在 0.05 下显著。下同。
WS: Wintering stage; RS: Regreening stage; JS: Jointing stage; HS: Heading stage; MS: Maturity stage. Different letters following data in the same column and year indicate significant difference between varieties at 0.05 level. The same in tables 3—6.

表 3 河南省不同年代小麦品种各生育时期的根系活力

Table 3 Root vigor of wheat varieties at different growth stages from different decades in Henan $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$						
年份 Year	年代 Decades	生育时期 Growth stage				
		WS	RS	JS	HS	MS
2024	1950	83.77b	70.85c	144.03d	66.48b	50.58b
	1960	82.10b	77.37bc	179.51c	69.25b	55.81b
	1970	119.27b	91.77abc	187.67c	83.89a	67.13b
	1980	176.37a	102.55a	232.01a	96.28a	76.08a
	1990	125.99b	95.53ab	217.02ab	85.53a	60.73b
	2000	93.66b	84.14abc	197.28bc	70.41b	59.59b
	2010	91.75b	81.38bc	194.50bc	66.56b	54.63b
2025	1950	116.24e	102.74e	137.10e	71.72c	43.87b
	1960	133.49de	105.09de	162.08cd	81.42bc	47.86b
	1970	144.68bc	106.87bc	172.23bc	87.55ab	53.43ab
	1980	187.07a	122.13a	210.02a	99.09a	63.48a
	1990	163.37b	108.65b	196.46ab	93.61ab	56.36ab
	2000	157.91cd	100.69cd	188.08abc	84.73bc	54.33ab
	2010	150.10cde	85.14cde	187.03abc	79.15bc	49.67b

表 4 河南省不同年代小麦品种根的全氮含量变化

Table 4 Changes of total nitrogen content in root of wheat varieties from different decades in Henan $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$						
年份 Year	年代 Decades	生育时期 Growth stage				
		WS	RS	JS	HS	MS
2024	1950	16.52c	19.47e	18.12c	13.12e	8.97e
	1960	18.37abc	21.76cd	20.64abc	15.14bc	10.78c
	1970	17.38bc	20.7de	19.88abc	14.37cd	10.12cd
	1980	17.12bc	20.42de	19.13bc	13.9de	9.27de
	1990	19.90ab	23.03bc	21.95ab	15.78b	11.77b
	2000	20.61abc	24.69ab	22.77ab	16.44b	12.48ab
	2010	20.97a	25.12a	23.08a	17.27a	13.06a
2025	1950	18.22d	22.03b	19.91c	14.23f	9.65e
	1960	20.31b	23.38ab	21.62abc	16.01cd	11.54bc
	1970	19.23c	22.19b	20.72bc	15.41de	10.94cd
	1980	18.84cd	22.05b	20.07c	14.94ef	10.20de
	1990	21.14ab	23.97ab	22.17ab	16.43bc	12.44ab
	2000	21.55a	24.58a	22.90ab	17.10ab	13.00ab
	2010	21.92a	25.39a	23.21a	17.79a	13.58a

2.4 河南省不同年代小麦品种根中可溶性糖含量的演变特征

不同年代小麦品种根中可溶性糖含量在各生育时期存在一定差异(表 5)。总体上,两年结果变化趋势基本一致。1950 年代品种根中可溶性糖含量相对较低,1960—1980 年代品种变化幅度较小,而 1980 年代以后总体呈增加趋势。1960—1980 年代品种平均根中可溶性糖含量较 1950 年代增加 7.4%,1980—2010 年代品种较 1960—

1980 年代和 1950 年代品种分别增加 9.2%和 17.3%。从整个生育期来看,不同年代小麦品种根中可溶性糖含量呈现出先升高后降低的变化趋势,在返青期达到峰值,成熟期最低,1950 年代品种成熟期较返青期平均减少 55.1%,1960—1980 年代减少 51.8%,1970—2010 年代减少 49.7%。总体上,河南省小麦品种根中可溶性糖含量随年代更替呈增加趋势,且现代品种在生育后期具有较强的可溶性糖保持能力。

表 5 河南省不同年代小麦品种根的可溶性糖含量

Table 5 Root soluble sugar content of wheat varieties from different decades in Henan

mg · g⁻¹

年份 Year	年代 Decades	生育时期 Growth stage				
		WS	RS	JS	HS	MS
2024	1950	26.60c	34.47d	26.12e	11.12d	7.77d
	1960	28.37bc	36.53c	28.64bc	13.64bc	9.41bc
	1970	27.38c	35.70c	27.81cd	12.37cd	8.92cd
	1980	27.12c	35.42cd	27.13de	12.08d	8.07cd
	1990	29.90ab	38.03b	30.03ab	13.78abc	10.56ab
	2000	30.7ab	39.69a	30.77a	14.44ab	11.28a
	2010	30.97a	40.12a	31.21a	15.27a	11.75a
2025	1950	28.26c	37.03c	26.88c	12.23d	8.45e
	1960	30.31b	38.30bc	29.62ab	14.01bc	10.27bc
	1970	29.23c	37.19c	28.71bc	13.41cd	9.74cd
	1980	28.84c	36.95c	28.07bc	12.95cd	9.00de
	1990	31.14ab	38.97ab	29.82ab	14.43abc	11.11b
	2000	31.23ab	39.58ab	30.90a	15.10ab	12.08a
	2010	31.92a	40.39a	30.92a	15.79a	12.41a

2.5 河南省不同年代小麦品种产量及其构成因素的演化

随着品种年代更替,小麦单株籽粒产量总体呈增加趋势(表 6)。2010 年代品种两年产量平均值较 1950、1960、1970、1980、1990、2000 年代分别增加 56.0%、32.0%、13.9%、10.0%、3.8%、1.3%;从产量构成因素看,单株穗数总体呈下降趋势,其中,1980—2010 年代平均单株穗数较 1950—1970 年代减少 15.8%,2010 年代较 1950 年代减少 29.7%;穗粒数呈现出先降低后升高的趋势,1960—1970 年代品种明显低于其他年代品种,差异达显

著水平,其中,1960—1970 年代品种平均穗粒数较 1950 年代减少 10.6%,1980—2010 年代较 1960—1970 年代平均增加 12.2%;千粒重随年代更替呈增加趋势,其中,1960—1970 年代较 1950 年代增加 27.0%,1980 年代较 1960—1970 年代增加 9.6%,1990—2010 年代较 1980 年代增加 8.8%,差异均显著。综合来看,河南省小麦品种改良过程中,单株籽粒产量提升主要伴随着单株穗数下降、穗粒数增加和千粒重持续增加的协同变化,其中千粒重增加可能是推动单株产量提高的重要因素。

表 6 河南省不同年代小麦品种的产量及其构成因素

Table 6 Yield and its components of wheat varieties from different decades in Henan

年份 Year	年代 Decades	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
2024	1950	5.58a	46.13ab	30.82d	6.03c
	1960	5.20ab	41.21c	38.26c	7.10bc
	1970	4.93b	43.14bc	40.62c	8.39ab
	1980	4.27c	46.25ab	44.50b	8.74ab
	1990	3.96c	47.44a	47.98a	9.00a
	2000	3.94c	47.75a	48.37a	9.08a
	2010	3.88c	48.86a	48.02a	9.06a
2025	1950	5.33a	40.38ab	31.65d	5.62c
	1960	5.29ab	34.66c	38.99c	6.67bc
	1970	5.13c	35.69bc	40.84c	7.57ab
	1980	5.25c	37.19ab	42.47b	7.78a
	1990	5.33a	39.15a	45.45a	8.51a
	2000	4.88c	39.38a	46.68a	8.86a
	2010	3.79d	41.11a	47.25a	9.11a

2.6 根系生理功能与产量性状的相关性分析

不同根系生理指标与产量性状的相关关系具有明显的生育时期差异(表 7)。根干重与单株穗数在返青期和成熟期多呈显著或极显著正相关,而与穗粒数和千粒重在各时期均呈不同程度负相关。根系活力与千粒重总体呈显著或极显著正相关,其中拔节期相关性最强;与单株穗数和穗粒数的相关关系则相对较弱。根中全氮含量与千粒重

在多数生育时期呈极显著正相关,而与单株穗数多呈负相关,相关关系较为一致。根中可溶性糖含量与单株穗数在 2024 年各时期均呈显著正相关,而与穗粒数和千粒重在多数时期呈显著负相关,其中拔节期与千粒重的负相关最强。总体来看,不同根系生理指标与产量构成因素之间存在明显的阶段性关联,其中根系活力和根中全氮含量与千粒重的关系较为密切。

表 7 不同生育时期小麦品种根系生理功能与小麦产量性状的相关性分析

年份 Year	根系指标 Root system indicator	生育时期 Growth stage	单株穗数 Spikes per plant	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight
2024	RDW	WS	0.173	−0.164	−0.008
		RS	0.373 **	−0.249 *	−0.272 *
		JS	0.214	−0.250 *	−0.244 *
		HS	0.227 *	−0.157	−0.362 **
		MS	0.283 *	−0.324 **	−0.396 **
	RV	WS	−0.026	−0.056	0.060
		RS	−0.052	−0.032	0.155
		JS	−0.376 **	0.114	0.415 **
		HS	−0.069	−0.114	0.205
		MS	−0.146	0.174	0.113
	TNCR	WS	−0.375 **	0.071	0.454 **
		RS	−0.449 **	0.131	0.533 **
		JS	−0.408 **	0.169	0.458 **
		HS	−0.430 **	0.229 *	0.528 **
		MS	−0.426 **	0.139	0.549 **
	SSCR	WS	0.390 **	−0.249 *	−0.530 **
		RS	0.639 **	−0.439 **	−0.632 **
		JS	0.514 **	−0.344 **	−0.653 **
		HS	0.524 **	−0.352 **	−0.563 **
		MS	0.257 *	−0.162	−0.330 **
2025	RDW	WS	0.166	−0.360 **	−0.064
		RS	0.233 *	−0.170	−0.251 *
		JS	0.132	−0.143	−0.202
		HS	−0.028	−0.192	−0.351 **
		MS	0.242 *	−0.249 *	−0.296 **
	RV	WS	0.138	0.014	0.337 **
		RS	0.115	−0.243 *	0.262 *
		JS	0.050	−0.064	0.530 **
		HS	−0.044	−0.104	0.280 **
		MS	0.156	0.033	0.339 **
	TNCR	WS	−0.260 *	0.220 *	0.577 **
		RS	−0.192	0.060	0.312 **
		JS	−0.262 *	0.138	0.469 **
		HS	−0.412 **	0.196	0.574 **
		MS	−0.202	0.080	0.461 **
	SSCR	WS	0.180	−0.296 **	−0.507 **
		RS	0.110	−0.313 **	−0.539 **
		JS	0.153	−0.317 **	−0.653 **
		HS	0.110	−0.297 **	−0.567 **
		MS	0.145	−0.130	−0.454 **

RDW:根干重;RV:根系活力;TNCR:根中全氮含量;SSCR:根中可溶性糖含量。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。
RDW:Root dry weight; RV: Root vigor; TNCR: Total nitrogen content in roots; SSCR: Soluble sugar content in roots. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

3 讨论

河南省不同年代小麦品种根系生理功能的变化,在一定程度上反映了品种改良过程中地下部性状对栽培条件和育种目标变化的适应性响应。有研究表明,根干重的增加有助于扩大吸收面积,提升水肥利用效率^[26]。本研究中,1950—1960年代品种的根干重显著高于其他年代品种,1960年代小麦品种根干重在多数生育期保持较高水平,这可能与早期栽培条件下品种依赖强大根系生物量适应环境的需求相符^[27]。本试验条件下,小麦根干重在生育期内先增后减、抽穗期达峰值,而根冠比在返青期达峰值,这可能是由于根、冠干物质在生育期内消长动态不同步。抽穗期是小麦根系生长与干物质积累的峰值,进入成熟期后,植株完成营养生长向生殖生长的转化,根系发生生理性衰老,细根解体且根系干物质向籽粒转运,导致根干重显著下降;而抽穗至成熟阶段,地上部光合产物持续向穗部运输,籽粒灌浆推动地上部干重持续增加,根干重“降”与地上部干重“升”的动态特征,最终造成根冠比下降,与根干重变化趋势一致。已有研究表明,现代小麦品种可在根干重降低的前提下实现产量提升^[28]。本研究中1980—2010年代品种根干重较1950—1970年代品种显著下降,但单株籽粒产量持续增加,与前人研究结论一致,这一现象可能源于矮化基因的引入^[29-30]。本研究发现,2025年根干重整体高于2024年,表明根系生长对年度环境条件具有较强响应^[31],但其具体原因仍需结合气象与土壤条件进一步分析。与根干重的下降趋势相一致,根冠比也呈现逐步降低的特征,2010年代品种根冠比较1950年代显著下降,这一变化与Fu等^[10]提出的现代小麦品种通过根冠协同提升产量和水分利用效率的结论相符,表明现代品种通过优化根系与地上部的生长协调关系,实现了资源分配效率的提升。

1950—1970年代品种可能受限于培育高株型、强化抗逆能力以及低肥栽培条件,根系活力整体处于低水平且波动明显,而1980年代成为根系活力改良的关键突破期,1990—2010年代品种虽拔节期活力较1980年代略有回落,但仍显著高于早期品种,且稳定性大幅提升,这与郭华等^[32]提出的“高根系活力品种在养分竞争中具有优势”的观点一致。相关性分析表明,根系活力与千粒重呈极显著正相关,拔节期为主要相关生育期,这一

关联特征为解析根系活力的产量调控效应提供了基础。1950—1970年代品种根系活力低且功能期相对较短,拔节期后快速下降,难以为籽粒灌浆提供养分支撑,其产量形成更多依赖单株穗数;而1990—2010年代品种拔节期较高的根系活力保障了幼穗分化的养分供应,生育后期维持的较高活力进一步满足了千粒重形成的养分需求。结合根系活力与千粒重的显著正相关特征,现代品种根系活力的水平提升与稳定性优化,强化了其对千粒重的正向效应,使其成为产量提升的重要生理驱动因子^[33]。

根中全氮含量与可溶性糖含量的整体上升趋势,体现了现代品种养分代谢效率的优化。1950—1970年代品种氮素积累能力弱,1980—1990年代是氮素积累的稳步提升期,这一变化与“高产优质育种”目标密切相关^[5],2000—2010年代品种不仅氮素积累量显著增加,返青期至拔节期全氮含量维持高位,保障幼穗分化的氮素需求,抽穗期至成熟期氮素快速转运至籽粒形成产量,这与张敏敏等^[34]报道的“现代品种氮素利用效率优于老品种”结论一致。总体相关性分析显示,根中全氮含量呈现与千粒重呈极显著正相关、与单株穗数呈显著或极显著负相关的“双极分化”的特征。随年代更替,现代品种氮素积累能力持续优化,使该特征下的产量效应更突出,实现了对千粒重的正向调控^[35-36]。对于可溶性糖含量而言,1950—1970年代品种储备不足且调节能力弱,1980—2010年代逐步实现高储备与优调节,2010年代小麦品种较1950年代在各生育期显著提高,这与王晓婧^[37]提出的根中可溶性糖动态变化与抗逆性和产量密切相关的观点相符。相关性分析明确了可溶性糖含量在返青期至抽穗期与单株穗数呈极显著正相关、拔节期与千粒重极显著负相关的关联规律,现代品种可溶性糖含量的提升与生育后期下降幅度的减小,使其更契合产量构成调控需求,返青期充足的可溶性糖储备保障了单株穗数的形成,拔节期后的调控则助力千粒重的提升,实现了碳源分配对产量构成因素的协同优化^[38],这也是现代品种千粒重显著高于早期品种的重要生理原因^[39]。

综上所述,根干重与产量性状的相关性特征揭示了现代品种资源分配策略的转变:根干重与千粒重在多数时期呈负相关,结合现代品种(2000—2010年代)根干重较早期品种(1950—1960年代)

降低 10.3%~17.0%,而产量提升 56.2%,表明现代品种可能通过优化根系与地上部的生长协调,实现资源分配效率的提升,而非根系生长,进一步证实根系生理功能优化而非生物量增加,是现代品种产量提升的核心路径^[28]。总之,河南省小麦品种改良过程中,根系生理功能已从 1950—1970 年代的“生物量依赖型”转变为 1980—2010 年代的“功能效率型”,通过优化根系活力稳定性、氮碳代谢效率及关键生育期的功能适应性,协调优化产量构成因素,通过千粒重增加、单株穗数适度减少实现高产^[40]。这一演变与施肥水平提高、栽培技术进步等农业生产条件改善密切相关^[41],更契合黄淮海麦区的生产实际^[15]。

4 结论

河南省小麦品种在 1950 年代至 2010 年代的更替过程中,根干重与根冠比总体上在 1950—1960 年代较高,1970 年代后逐渐下降;根系活力总体呈先升高后降低并趋于稳定的趋势,以 1980 年代品种表现较高;根中全氮含量和可溶性糖含量总体随年代更替而增加;单株籽粒产量随年代推进持续提升后趋于稳定;产量构成因素呈现协同优化特征,千粒重稳定增长,单株穗数呈下降趋势,穗粒数小幅增加,千粒重的提升可能是产量增加的重要因素。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] HAI C, LI Y, PENG C, *et al.* Single-cell nuclear transcriptomics reveal root tip adaptations to nitrogen scarcity in wheat [J]. *The Crop Journal*, 2025, 13(4): 1156.
- [3] 马文奇. 小麦初生根和次生根氮磷钾积累与水肥利用效率的差异分析[D]. 郑州:河南农业大学,2024.
MA W Q. Difference in accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium and use efficiency of both water and nutrients between seminal and nodal roots in wheat (*Triticum aestivum* L.) [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
- [4] 张志勇,秦步坛,熊淑萍,等. 小麦开花期灌水对土壤养分及根系分布的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(12): 3328.
ZHANG Z Y, QIN B T, XIONG S P, *et al.* Effects of irrigation at flowering stage on soil nutrient and root distribution in wheat field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3328.
- [5] ANDERSSON A, JOHANSSON E, OSCARSON P. Nitrogen redistribution from the roots in post-anthesis plants of spring wheat [J]. *Plant and Soil*, 2005, 269(1-2): 321.
- [6] 樊廷录,马明生,王淑英,等. 限量灌溉不同品种冬小麦茎可溶性糖与产量和水分利用率的关系[J]. 中国农业科学,2010,43(12): 2428.
FAN T L, MA M S, WANG S Y, *et al.* A study on the relationship between stem soluble sugar with grain yield and water use efficiency in different winter wheat under limited irrigation condition [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(12): 2428.
- [7] 曹廷杰,赵虹,王西成,等. 河南省半冬性小麦品种主要农艺性状的演变规律[J]. 麦类作物学报,2010,30(3): 439.
CAO T J, ZHAO H, WANG X C, *et al.* Evolution of main agronomic traits for semi-winter wheat varieties in Henan Province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(3): 439.
- [8] 张鹏钰,卫丽,白田田,等. 河南省不同年代小麦品种苗期渗透胁迫的生理响应[J]. 华北农学报,2016,31(6): 119.
ZHANG P Y, WEI L, BAI T T, *et al.* Physiological response to osmotic stress at seedling stage of wheat cultivars from different periods in Henan Province [J]. *Acta Agriculturae Borreali-Sinica*, 2016, 31(6): 119.
- [9] MATTHEW R, JOHN M F, A G S, *et al.* Raising yield potential in wheat [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(7): 1899.
- [10] FU Y, DAI J Y, YANG H, *et al.* Newer wheat cultivars achieved greater yield and water productivity through root and canopy synergies in the North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2025, 328: 109880.
- [11] 张煜. 河南省小麦品种产量的遗传改进及相关生物学特性的研究[D]. 郑州:河南农业大学,2015.
ZHANG Y. Genetic improvement in grain yield and associated biological characteristics of wheat in Henan Province of China [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2015.
- [12] FENG F, DANG P, PU X, *et al.* Contribution of proximal and distal grains within spikelets in relation to yield and yield components in the winter wheat production region of China from 1948 to 2012 [J]. *Agronomy*, 2019, 9(12): 850.
- [13] LI Y, TAO F, HAO Y, *et al.* Wheat traits and the associated loci conferring radiation use efficiency [J]. *The Plant Journal*, 2022, 112(2): 565.
- [14] WANG Y Q, XI W X, WANG Z M, *et al.* Contribution of ear photosynthesis to grain yield under rainfed and irrigation conditions for winter wheat cultivars released in the past 30 years in North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10): 2247.
- [15] 冯帆. 黄淮海麦区不同年代冬小麦品种产量及相关性状演变规律[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
FENG F. Evolution in yield and related traits of winter wheat released in different decades in Huang-Huai-Hai region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [16] ZHAO P, LIU Z, SHI X, *et al.* Modern wheat breeding selection synergistically improves above- and belowground traits [J]. *Plant Physiology*, 2024, 196(1): 47.
- [17] ZHANG Z, QIU X, GUO G, *et al.* An automated root phenotype platform enables nondestructive high-throughput root system architecture dissection in wheat [J]. *Plant Physiology*, 2025, 198(1): 154.
- [18] LI H, LI L, LIU N, *et al.* Balanced below- and above-ground growth improved yield and water productivity by cultivar renewal for winter wheat [J]. *Frontiers in Plant Science*,

- 2022,13:1022023.
- [19] HEŘMANSKÁ A, STŘEDA T, CHLOUPEK O. Improved wheat grain yield by a new method of root selection [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(1):195.
- [20] GILES J W, BAHMAN E. Domestication and crop physiology: Roots of green-revolution wheat [J]. *Annals of Botany*, 2007, 100(5):991.
- [21] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 小麦氮素利用效率的基因型差异[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2):369.
ZHANG X Z, YANG X B, LI T X, et al. Genotype difference in nitrogen utilization efficiency of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2):369.
- [22] 周燕, 杨文文, 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.
- [23] 李爱国, 宋晓霞, 张文斐, 等. 2001—2020年河南省审定小麦品种育种特点及表型性状演变分析[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(8):947.
LI A G, SONG X X, ZHANG W F, et al. Breeding characteristics and phenotypic traits evolution of wheat varieties approved in Henan Province during 2001—2020 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(8):947.
- [24] 胡敏, 贺德先. 小麦根系活力的昼夜变化及最佳取样和测定时间[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6):1094.
HU M, HE D X. Study on diurnal fluctuations of physiological activity of roots and the optimal time to sample and determine their activity in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(6):1094.
- [25] 刘永强. 在红蓝光培育模式下氮磷共掺杂碳量子点对小麦光合作用的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2023.
LIU Y Q. Effect of nitrogen and phosphorus Co-doped carbon quantum dots on photosynthesis of wheat under red-blue light cultivation model [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [26] YAN M, LIAN H, ZHANG C, et al. The role of root size and root efficiency in grain production, water-and nitrogen-use efficiency in wheat [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(14):7083.
- [27] 苗青霞, 方燕, 陈应龙. 小麦根系特征对于旱胁迫的响应[J]. 植物学报, 2019, 54(5):652.
MIAO Q X, FANG Y, CHEN Y L. Responses of wheat root traits to drought stress [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2019, 54(5):652.
- [28] AZIZ M M, PALTA J A, SIDDIQUE K H M, et al. Five decades of selection for yield reduced root length density and increased nitrogen uptake per unit root length in Australian wheat varieties [J]. *Plant and Soil*, 2017, 413(1-2):181.
- [29] IVÁN M, MARIO M, MARCOS P, et al. Genetic progress in winter wheat cultivars released in Chile from 1920 to 2000 [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2012, 72(3):303.
- [30] MCGRAIL R K, MCNEAR D. Two centuries of breeding has altered root system architecture of winter wheat [J]. *Rhizosphere*, 2021, 19:100411.
- [31] CHEN Y, PALTA J A. Editorial: Root structure and function adapting to climate change [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15:1365263.
- [32] 郭华. 不同年代小麦品种光合效率和氮素吸收利用的差异及其生理机理[D]. 南京:南京农业大学, 2019.
GUO H. Differences and physiological mechanisms in photosynthetic efficiency and nitrogen absorption and utilization of wheat cultivars released in different era [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [33] ZHENG X, YU Z, SHI Y, et al. Differences in water consumption of wheat varieties are affected by root morphology characteristics and post-anthesis root senescence [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12:814658.
- [34] 张敏敏, 翟丙年, 宋翔, 等. 冬小麦不同基因型氮素利用效率的差异及机理分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8):245.
ZHANG M M, ZHAI B N, SONG X, et al. Difference and mechanism of nitrogen use efficiency (NUE) in different winter wheat genotypes [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(8):245.
- [35] 王峥. 陕西小麦品种改良过程中产量性状和养分利用特性及其生理响应机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
WANG Z. Genetic improvement of wheat yield characters and nutrient related traits and its physiological response mechanism in Shaanxi [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [36] 王庆源, 于振文, 石玉, 等. 隔两年深松配合条旋耕显著提升冬小麦的氮素吸收利用效率和产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(5):863.
WANG Q Y, YU Z W, SHI Y, et al. Strip rotary tillage combining with every two-year subsoiling increases the nitrogen use efficiency and yield of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2024, 30(5):863.
- [37] 王晓婧. 黄淮海平原小麦产量、品质及土壤温室气体排放对土壤增温的响应[D]. 开封:河南大学, 2024.
WANG X J. Response of wheat yield, quality and soil greenhouse gas emissions to soil warming in Huang-Huai-Hai region [D]. Kaifeng: Henan University, 2024.
- [38] LIANG X G, GAO Z, FU X X, et al. Coordination of carbon assimilation, allocation, and utilization for systemic improvement of cereal yield [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14:1206829.
- [39] 丁彤彤. 黄土高原不同降水量分配下冬小麦根系深扎调控水分吸收机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
DING T T. The mechanism of regulating water absorption through wheat deep rooting under varied precipitation distribution in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [40] 崔振坤, 于振文, 石玉, 等. 水氮运筹对小麦光合物质生产和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(6):1564.
CUI Z K, YU Z W, SHI Y, et al. Effects of water and nitrogen management on photosynthetic matter production and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(6):1564.
- [41] 曾香存, 常莹莹, 董海滨, 等. 河南省小麦种质资源品质特性多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(1):67.
ZAN X C, CHANG Y Y, DONG H B, et al. Quality characteristics diversity of wheat germplasm resources in Henan Province [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2025, 26(1):67.