

30 个小麦品系的镉积累能力评价及耐镉品系根系生长特征

崔峰

(安徽省新马桥原种场有限公司, 安徽 蚌埠 233704)

摘要: 小麦作为我国重要的粮食作物, 其产量和品质受多种因素影响, 其中土壤镉严重威胁着小麦安全生产, 因此筛选小麦镉低积累品种对解决镉污染耕地小麦安全生产具有重要意义。本研究选取黄淮麦区 30 个小麦品种(系), 通过土培试验, 设置 0g/L、2.5g/L、5g/L 三个镉离子浓度水平, 探究了小麦镉积累能力和镉胁迫条件下小麦幼苗根系指标与镉积累之间的关系。结果表明: 镉胁迫能够显著抑制小麦苗期生长, 但对幼苗有机物积累影响较小, 且镉元素大部分积累在小麦幼苗根系内, 同时品种间差异显著; 镉对高积累品种小麦根系的抑制作用较大, 而对低积累品种根系抑制作用较小。研究筛选出了西农 889、新麦 36、周麦 36、豫麦 51、淮麦 18 等 5 个镉低积累品种; 初步解释了小麦苗期根系形态与镉积累能力的相关性, 为黄淮麦区小麦品种筛选及镉污染耕地小麦安全生产提供了一定的参考。

关键词: 小麦; 镉; 根系; 幼苗

中图分类号: S512 文献标识码: A 文章编号: 0488-5368(2026)02-0050-05

Evaluation of Cadmium Accumulation Capacity and Root Growth Characteristics of 30 Wheat Varieties (Lines) from Huang-Huai Region

CUI Feng (Anhui Xinmaqiao Foundation Seed Farm Co., Ltd., Bengbu, Anhui 233704, China)

Abstract: Wheat, a crucial food crop in China, challenges affecting yield and quality from multiple environmental factors, among which soil cadmium (Cd) contamination severely threatens safe production. Therefore, identifying wheat varieties with low Cd accumulation is essential for ensuring safe wheat cultivation in Cd-contaminated farmlands. In this study, 30 wheat varieties (lines) from the Huang - Huai wheat-growing region were evaluated. A soil culture experiment was conducted using three Cd concentration levels (0 mg/L, 2.5 mg/L, and 5 mg/L) to assess Cd accumulation capacity and to explore the relationship between root growth traits and Cd accumulation under Cd stress. The results were as follows: (1) Five low Cd-accumulating varieties were identified: 'Xinong 889', 'Xinmai 36', 'Zhoumai 36', 'Yumai 51', and 'Huaimai 18'. (2) Cd stress significantly inhibited wheat seedling growth but had a relatively limited effect on organic matter accumulation. Most Cd accumulated in seedling roots, and significant differences were observed among varieties. (3) Cd stress caused stronger inhibition of root growth in high Cd-accumulating varieties, whereas inhibition was weaker in low Cd-accumulating varieties. These findings clarify the relationship between root morphology and Cd accumulation in wheat seedlings and provide a scientific basis for wheat variety selection and safe production in Cd-contaminated areas of the Huang - Huai region.

Key words: Wheat; Cadmium; Root system; Seedling

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 作为全球三大主要粮食作物之一, 其种植范围覆盖温带、亚热带等多个气候带, 是全球约 35% 人口的主要食物来源^[1]。小麦不仅为人类提供约 20% 的膳食热量和蛋白

收稿日期: 2025-02-24 修回日期: 2025-04-18

作者简介: 崔峰 (1980-), 女, 助理农艺师, 主要从事小麦育种与栽培研究工作。

质,其产量和品质更直接关系到全球粮食安全与人类健康。据国家统计局 2023 年数据显示,我国小麦播种面积达 23 059 千 hm^2 ,总产量 13 453 万 t,消费总量 13 490 万 t,产需缺口约 37 万 t,呈现出紧平衡态势。这种供需格局凸显了小麦在保障我国粮食安全中的战略地位,特别是在当前全球气候变化和耕地资源受限的背景下,维持小麦生产的稳定性对确保国家粮食安全具有重要的现实意义。

近年来,随着工业化进程的加速,由采矿冶炼、工业废气废液排放、污水灌溉以及农药化肥过度使用等人为活动导致的镉污染问题日益严重^[2]。研究表明,镉污染已对农业生产和生态环境构成严重威胁。在河南三门峡矿区的调查发现,矿区种植的小麦籽粒镉含量较对照区域高出 30%,超标幅度达国家标准的 2~3 倍^[3]。更为严峻的是,部分已知或潜在的镉污染耕地仍在进行小麦生产活动。以河南省某铅锌冶炼厂周边农田为例,该区域种植的小麦籽粒镉污染超标率高达 97.37%,最高超标值达到国家标准的 15 倍^[4]。镉作为一种具有强稳定性、易积累且难以清除的重金属元素,其环境行为特征值得关注。研究表明,环境中 82%~94%的镉最终会进入土壤系统^[5],并通过食物链在生物体内逐级富集,最终危害人类健康。镉通过膳食途径进入人体后,可引发多系统毒性效应,包括内脏器官损伤、呼吸系统功能障碍、骨质疏松、肾功能衰竭以及癌症等^[6,7]。从作用机制来看,镉离子进入血液循环后主要吸附于红细胞表面,通过抑制血红蛋白合成、破坏血管内皮结构,导致组织器官供血不足,进而引发多系统损伤。历史上,2013 年中

国"镉大米"事件和 20 世纪 20 年代日本"痛痛病"事件均为典型的镉污染食物链传递案例^[8]。

鉴于镉污染的严重性和危害性,筛选和培育镉低富集小麦品种,并深入研究镉胁迫对小麦根系形态结构的影响,已成为降低镉通过食物链富集风险、保障粮食安全的重要策略。通过系统解析镉胁迫下小麦根系构型参数(如根长、根表面积、根体积),可为镉低积累小麦品种的选育和筛选提供重要依据。这一研究方向不仅对维护人类健康、保障粮食安全具有重要意义,同时也为构建环境友好型农业体系、实现农业可持续发展提供了科学依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与处理

营养土镉含量测定参考 GB/T17141-1997《土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法》标准^[9]。称取营养土大约 0.3 g 置于锥形瓶中,使用硝酸和高氯酸混酸液进行消解,直至营养土样品完全消解,将酸液蒸发至尽量少,但未干状态,冷却后将消化液定容于 10 mL 容量瓶,用原子吸收光谱仪测定镉离子含量,设置 3 次生物学重复。

本研究以西农 509、西农 979、西农 511、西农 585、西农 889 等 30 个黄淮南片麦区小麦新品种(系)(表 1)为材料,选籽粒健康饱满的种子用蒸馏水浸种,每 4 h 换一次水,36 h 后种植于装有营养土的培养盆内,每盆种植 10 株。待小麦出芽 3~5 cm 时,分别施 0 g/L(A 组)、2.5 g/L(B 组)和 5 g/L(C 组)硫酸镉溶液^[10,11],每次施入 50ml,共施 5 次,合计施入 250ml。设置 3 次生物学重复。

表 1 30 个黄淮麦区小麦新品种(系)

序号	品种(系)名称	审定情况	序号	品种(系)名称	审定情况
1	轮选 66	国审	16	西农 585	国审
2	周麦 28	国审	17	郑麦 366	国审
3	周麦 36	国审	18	周麦 22 号	国审
4	西农 889	省审	19	中麦 415	国审
5	西农 511	国审	20	丰德存麦 5 号	国审
6	开麦 18	国审	21	淮麦 18	国审
7	新麦 36	国审	22	郑麦 366	国审
8	凌科 686	否	23	新麦 29	国审
9	周麦 37	国审	24	烟农 999	国审
10	中麦 895	国审	25	西农 979	国审
11	豫麦 51	国审	26	许科 6 号	国审
12	郑麦 119	国审	27	西农 509	国审
13	百农 207	国审	28	良星 99	国审
14	淮麦 30	国审	29	中育 1123	国审
15	瑞华麦 520	国审	30	徐麦 35	国审

1.2 测定项目及方法

1.2.1 不同镉离子处理下植株生物量测定 不同镉离子处理前, 试验用营养土镉含量三次均未测出。随后用不同镉离子溶液对营养土进行处理, 待不同浓度镉溶液处理的小麦苗子发育至 15 d 时, 将整株苗子从花盆里面取出, 分别用超纯水将根部营养土清洗干净, 用滤纸将根部水分完全吸干, 然后置于万分之一天平称量鲜重。此后, 将上述材料分别放入称量瓶, 置于 60℃ 条件下干燥至恒重, 前后 2 次称重差值在 ±0.1 mg 之间时, 称量干重。设置 3 次生物学重复。

1.2.2 不同镉离子处理下根系镉含量测定 试验样本镉含量检测方法参考 GB/T 5009.15-1996《食品中镉的测定方法》中湿式消解法^[12]。首先, 将烘干的小麦根系称重后放入锥形瓶, 依次加入硝酸 10 mL、高氯酸 2 mL, 充分混合后, 加盖一小漏斗, 然后将锥形瓶置于电热板上加热, 按反应阶段不断调整升温, 溶液由棕色转至黄褐色, 最后颜色逐渐变淡至透明色, 待瓶内产生微量白烟时, 取下漏斗, 使酸液挥发至接近干的状态, 取出锥形瓶自然冷却, 冷却后将消化液洗至 10 mL 容量瓶中, 并用少量去离子水洗涤锥形瓶 3 次, 洗液合并, 且定容于 10 mL 容量瓶, 混匀备用。用原子吸收光谱仪测定镉含量, 具体测试方法参照 Metwally 等 (2005) 方法, 并计算其耐镉性指数, 评价不同小麦品种根系镉富集能力^[13]。设置 3 次生物学重复。

1.2.3 镉高(低)积累型小麦品种根系特征分析

待不同浓度镉溶液处理的小麦苗子发育至 15d, 且鲜重称量结束以后, 分别取 5 株小麦苗将其根系置于根系扫描仪 (Scan Maker i800 Plus Scanner, 中国) 内, 测定总根长、投影面积、表面积、根直径、体积和根尖数。设置 3 次生物学重复。

1.3 数据分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2010 整理, 并利用 SPSS 19.0 统计分析软件的单因素 ANOVA 中 LSD 法进行数据分析及差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同镉溶液处理下小麦各品种生物量比较

对不同浓度硫酸镉处理小麦鲜重和干重进行称量, 同时进行方差分析, 结果如表 2 所示: A 组 (0 g/L 硫酸镉溶液处理组) 小麦品种鲜重变幅为 3.04~11.91 g, 均值为 7.61 g, 干重为 0.51~1.47 g, 均值为 0.97 g; B 组小麦品种鲜重为 2.27~10.17 g, 均值为 6.64 g, 干重为 0.43~1.51 g, 均值为 0.96 g; C 组小麦品种鲜重为 2.48~9.71 g, 均值为 5.84 g, 干重为 0.40~1.41 g, 均值为 0.93 g。与此同时, 对照组与镉处理组小麦鲜重均存在显著差异, 其中 A 组与 C 组均值存在极显著差异, 但各组干重未表现出显著性差异 (表 2)。表明重金属镉会严重抑制小麦幼苗生长, 但对幼苗有机物质积累影响不显著, 其原因可能是一定浓度镉离子会抑制小麦根系吸收大分子营养物质和水分, 从而使不同镉浓度处理下小麦植株鲜重存在显著差异。

表 2 不同镉浓度处理条件下小麦干重与鲜重

(g)

处理	指标	N	均值	标准差	标准误	均值的 95% 置信区间		极小值	极大值
						下限	上限		
A	鲜重	30	7.61 Aa	2.27	0.41	6.76	8.46	3.04	11.91
B	鲜重	30	6.63 Bab	1.97	0.36	5.89	7.373	2.27	10.17
C	鲜重	30	5.84 Cbc	2.20	0.40	5.02	6.67	2.48	9.71
A	干重	30	0.97 A	0.24	0.04	0.88	1.06	0.51	1.47
B	干重	30	0.96 A	0.29	0.05	0.85	1.07	0.43	1.51
C	干重	30	0.93 A	0.26	0.04	0.80	1.03	0.40	1.41

注: 大写字母代表显著差异 $p < 0.05$; 小写字母代表极显著差异 $p < 0.01$ 。

2.2 不同小麦品种根系镉积累量分析

对不同镉浓度处理下小麦根系积累量进行测定, 结果如表 3 所示, A 组内小麦根系镉含量为 0.000 19~0.009 71 mg/g, 且极值差值最大, 差异倍数高达 50.5 倍; B 组小麦品种根系镉含量范围为 0.011~0.078 mg/g; C 组小麦品种根系镉含量范围为 0.012~0.093 mg/g, 差异倍数约 7 倍。与此同时, 处理组小麦品种根系镉含量存在极显著差

异, 且成正态分布 (表 3)。根据不同浓度镉处理下小麦根系镉含量检测数值和方差分析结果, 定义各处理组小麦根系镉含量位于总样本前 15% 的品种为镉高积累型品种, 后 15% 的品种为镉低积累型品种。与此同时, 在不考虑各处理与重复之间误差影响, 各处理组均筛选出 10 个品种, 其中五个品种为镉高积累品种, 5 个品种为镉低积累品种, 具体表现为: A 组根系镉高积累型品种有徐麦 35、周麦

22 号、百农 207、西农 889、中育 1123,根系镉低积累型品种有许科 6 号、新麦 36、丰德存麦 5 号、豫麦 51、周麦 36;B 组根系镉高积累品种有周麦 22 号、徐麦 35、烟农 999、百农 207、新麦 29,根系镉低积累品种有开麦 18、新麦 36、郑麦 366、豫麦 51、凌科 686;C 组根系镉高积累型品种有周麦 22 号、徐麦 35、百农 207、瑞华麦 520、中育 1123,镉低积累

品种有西农 889、新麦 36、周麦 36、豫麦 51、淮麦 18。综合上述研究结果,并考虑品种在不同镉污染条件下小麦根系的镉积累稳定性,本研究共筛选出 2 个镉高/低积累型小麦品种开展下一步根系形态参数响应镉胁迫研究,分别为徐麦 35 和新麦 36,且两个品种根系镉积累能力差异显著。

表 3 不同镉浓度处理下小麦根系镉含量

处理	品种数	均值	标准差	标准误	极小值	极大值	差异倍数
A	30	0.002 60 a	0.002 59	0.000 47	0.000 19	0.009 71	50.506 91
B	30	0.035 48 b	0.017 43	0.003 18	0.010 89	0.078 13	7.171 55
C	30	0.048 64 c	0.027 04	0.004 93	0.011 91	0.093 41	7.842 05

注:小写字母代表极显著差异 $p < 0.01$ 。

2.3 镉高/低积累型小麦根系指标分析

小麦根系与土壤直接接触,因此土壤中各类物质均会第一时间与小麦根系接触,并对其产生影响,尤其是重金属离子会对小麦根系及地上苗发育产生一定负面影响。与此同时,小麦根系的发育与小麦产量和籽粒品质密切相关。其中,根长、根表面积、根体积和根直径等指标能客观反映小麦对水分与养分的吸收能力,以及根系生长状况和根系与土壤接触情况。本研究对不同浓度镉处理下镉高积累品种徐麦 36 和低积累品种新麦 36 根系相关指标进行测试,结果如图 1 所示;与徐麦 35 相比较,2.5 g/L 硫酸镉溶液处理下新麦 36 总根长显著增加,且随着镉浓度增加至 5 g/L 硫酸镉溶液处理

时总根长呈下降趋势;2.5 g/L 硫酸镉溶液处理下,新麦 36 根投影面积、根表面积、根体积及根尖数显著高于徐麦 35,且其他浓度镉处理下根投影面积、根表面积、根体积及根尖数均无显著差异;5 g/L 硫酸镉溶液处理下,新麦 36 根系根直径显著大于徐麦 35。与此同时,徐麦 35 在不同镉浓度处理下,除根长与根尖数之外,其他指标均呈逐渐下降趋势,而新麦 36 则呈先升高,后下降趋势。表明重金属镉会对镉高积累品种小麦根系具有较大的抑制作用,从而影响其对水分与营养物质的吸收和干物质的积累,而对低积累品种小麦根系抑制作用较小,或体现为低浓度促进根系发育,高浓度抑制根系发育。

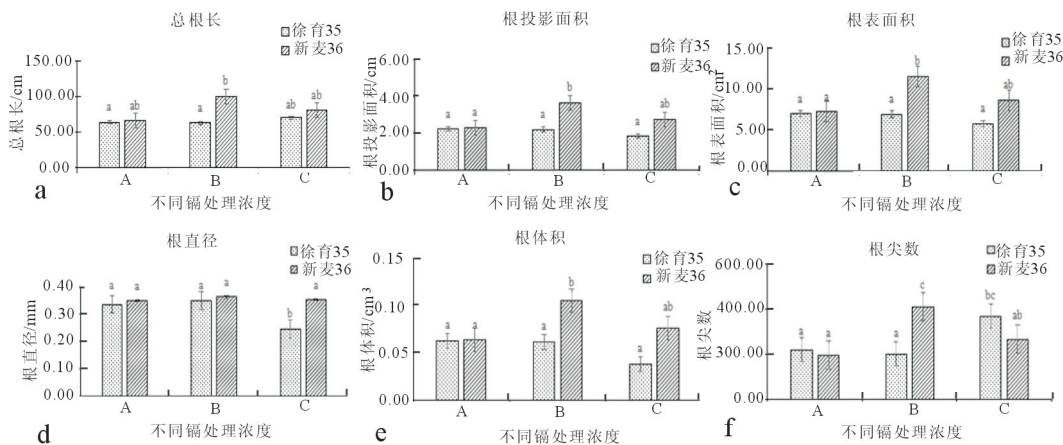


图 1 不同镉处理组徐麦 35 和新麦 36 根系形态参数测定

3 结论与讨论

镉对小麦生长发育影响较大,尤其是高浓度镉离子危害会对植株发育进程产生严重阻滞。本研究发现,0 g/L 硫酸镉溶液处理组小麦苗鲜重均值为 7.61 g,干重均值为 0.97 g,2.5 g/L 硫酸镉溶液

处理组小麦苗鲜重均值为 6.64 g,干重均值为 0.96 g;5 g/L 硫酸镉溶液处理组小麦苗鲜重均值为 5.84 g,干重均值为 0.93 g,表明一定浓度的重金属镉会抑制小麦幼苗生长,但对幼苗有机物积累影响较小。类似结果在前人研究中也得到了证实。Andrei 等研究发现,镉胁迫条件下植物水分和养分

的吸收会受到严重抑制^[14],碳水化合物代谢紊乱,以至于生长量和产量下降,并随着镉浓度的上升毒害作用进一步加剧^[15-17]。与此同时,慈敦伟等也研究发现镉离子胁迫下,小麦叶片光合系统会受损,同时气体交换参数和叶绿素荧光参数会随着镉离子浓度的增加而显著下降,并伴随着生物量逐渐降低^[18]。

镉离子富集会对小麦产生胁迫,然而不同品种受相同浓度镉离子危害时对其吸附能力却表现出显著差异。这一点在本研究中也得到了证实。本研究发现,30 个黄淮麦区主栽小麦品种的镉富集能力存在显著差异。与此同时,不同浓度镉处理条件下,镉高积累型小麦品种和镉低积累型小麦品种对镉的吸收储存能力存在显著差异,且吸收积累能力随镉浓度变化也呈现动态变化特征,其中镉低积累型品种新麦 36 的生长势和根系生长状况在不同浓度镉处理组中均优于徐麦 35。类似研究结果在前人研究中也得到了证实。孙亚莉研究发现低浓度镉胁迫下镉敏感型水稻品种幼苗苗高、根长、鲜重与干重显著减小,镉耐受能力强的水稻品种(系)的幼苗高、根长、鲜重与干重等与对照均无显著差异,但在较高浓度镉胁迫下,所有水稻品种苗期性状指标均显著降低^[19]。同时,前人也研究发现,高等植物存在显著的镉耐性基因型差异^[20,21]。

镉作为植物逆境胁迫因子,其作用效果因种子萌发环境中镉离子浓度及品种耐受程度而异。前人研究发现,低浓度镉离子可以促进小麦种子萌发,而高浓度则会对种子萌发产生抑制作用^[22]。此外,部分小麦品种在低浓度镉处理下表现出根系促进生长的作用^[23]。上述研究结果在马文丽等研究镉处理对乌麦及小麦种子萌发幼苗生长过程中也得到了证实,其研究发现,一定浓度的镉处理对小麦和乌麦种子萌发具有激活效应,而高浓度的镉离子则会对小麦和乌麦生长发育产生抑制效应^[24]。但上述研究结果与本研究结果存在些许偏差。本研究发现,新麦 36 的总根长、根投影面积、根表面积、根体积和根尖数在 2.5 g/L 硫酸镉溶液处理组和 5.0 g/L 硫酸镉溶液处理组中均呈现促长现象;徐麦 35 根系在不同处理组内的根长、根表面积、根体积、投影面积无显著性差异,但在 0.0 g/L 硫酸镉溶液处理组与 5.0 g/L 硫酸镉溶液处理组和 2.5 g/L 硫酸镉溶液处理组与 5.0 g/L 硫酸镉溶液处理组内根直径与根尖数受显著抑制。上述结果表明,本研究设置的 5.0 g/L 硫酸镉处理浓度可能未达到徐麦 35 和新麦 36 的镉胁迫临界值,

且胁迫反应存在一定的基因型差异。此外,本研究发现镉胁迫下小麦根系指标可以作为不同品种镉积累能力的评价参数。这一点在程旺大等研究镉胁迫对水稻生长和营养代谢影响时也得到了证实,其发现水稻苗期镉离子耐受性与后期镉离子耐受性的一致性、苗期镉离子耐受性是作为后期镉离子耐受性指标评价的关键^[25]。与此同时,本研究筛选获得小麦镉低积累型品种,为后续镉污染区小麦生产提供了品种参考。

参 考 文 献:

- [1] 赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦生产概况及其发展[J]. 作物杂志,2018(4):1-7.
- [2] 李婧,周艳文,陈森,等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. 安徽农学通报,2015,21(24):104-107.
- [3] 徐友宁,张江华,柯海玲,等. 某金矿区农田土壤镉污染及其环境效应[J]. 中国地质,2013,40(2):636-643.
- [4] 何冠华. 不同基因型小麦对土壤重金属污染响应及抗性筛选研究[D]. 郑州:河南农业大学,2012.
- [5] 崔力拓,耿世刚,李志伟. 我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J]. 现代农业科技,2006(11):184-185.
- [6] 彭佳师,王娅婷,王梦琦,等. 植物重金属镉积累调控机制及其应用研究进展[J]. 植物生理学报,2024,60(2):185-210.
- [7] 赵方杰,谢婉滢,汪鹏. 土壤与人体健康[J]. 土壤学报,2020,57(1):1-11.
- [8] 成希. 土壤污染防治法预计 3 年内出台[N]. 南方日报,2013-05-24(A13).
- [9] 张家洋,陈丽丽,楚莉莉,等. 锌镉单一胁迫对小麦和稗草生理生化特性的影响[J]. 西南林业大学学报. 2018. 38(6):89-96.
- [10] 周晓燕,石怀超,施志鹏,等. 腐植酸钠对铅、镉胁迫小麦种子萌发及生长的影响. 分子植物育种,2018(16)14:4 793-4 801.
- [11] 中国环境监测总站. 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法. GB/T 17141-1997.
- [12] 卫生部卫生监督局. 食品中镉的测定方法. GB/T 5009.15-1996.
- [13] Metwally A, Safronova VI, Belimov AA, et al. Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L. [J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(409):167-178.
- [14] Andrei AB, Vera IS, Viktor ET, et al. Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L. [J]. Euphytica, 2003(131): 25-35.

(下转第 75 页)