



张珂,高楠,张凌基,等. 镉对不同品种小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 轻工学报,2022,37(1):118-126.
ZHANG K,GAO N,ZHANG L J,et al. Effects of cadmium on seed germination and seedling growth of different wheat varieties[J]. Journal of Light Industry,2022,37(1):118-126. DOI:10.12187/2022.01.016

镉对不同品种小麦种子萌发及幼苗生长的影响

张珂^{1,2},高楠¹,张凌基¹,刘可欣¹,厉萌萌³,王凯¹,马闯^{1,2},张宏忠^{1,2}

1. 郑州轻工业大学 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001;
3. 森特士兴集团股份有限公司, 北京 100176

摘要:以郑麦1354、周麦27、周麦30、郑麦9023为研究对象,通过培养皿滤纸萌发试验,研究重金属镉(Cd)在不同质量浓度(0 mg/L、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L)下对不同品种小麦种子萌发及幼苗生长的影响。结果表明:郑麦1354的发芽势、发芽率、活力指数、根长和芽长均在Cd胁迫质量浓度为5 mg/L时达最大值;周麦27的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数均随Cd胁迫质量浓度的增加呈先升高后降低的趋势;周麦30和郑麦9023的发芽势和发芽指数均在5~20 mg/L的Cd胁迫质量浓度下低于对照;Cd胁迫质量浓度>50 mg/L时,郑麦9023的根长和芽长均受到显著抑制;隶属函数值综合评价结果显示,4个小麦品种中,周麦27耐Cd性最强,同时具备高发芽率(93%),可作为耐Cd性小麦培育优选品种。

关键词:镉;小麦;种子萌发;幼苗生长

中图分类号:X50 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2022)01-0118-09

0 引言

土壤中重金属(非必需植物元素)的持续积累已成为农作物生长及品质保障的重要安全隐患,其中,镉(Cd)作为世界各地农业土壤的严重威胁逐渐成为研究热点^[1-4]。Cd通常存在于锌矿中,并在前20种有毒金属中排名第7,1993年被国际肿瘤研究协会(IRPAC)列为第一类致癌物^[5-6]。2014年4月,环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[7]显示,全国土壤总点位超标率为16.1%,其中重金属Cd的点位超标率高达7%,为污染物超标排名之首。土壤中Cd的主要来源是农业施用磷肥、污水污泥排放、工业大气沉积等^[8]。Cd以非必需的形式在土壤中存在且易于溶解和移动,一方面

会使土壤理化性质发生改变;另一方面,即使低浓度的Cd也会很快被农作物吸收摄取并在其不同部位转运积累,影响农作物体内自由基和活性氧的产生,破坏活性氧平衡进而抑制自身生长,并对其产生危害^[9-13]。Cd对农作物产生毒性危害的关键步骤在于农作物根部吸收并向地上部分转移,进而影响作物的形态及生理生化特征,最常见的形态学症状包括根和芽生长发育不良、正常生物量积累减少及叶片褪色,最终导致作物死亡^[14-16]。被农作物吸收的Cd通过食物链富集,也会对人类健康构成潜在威胁^[17-18]。

植物种子的萌发期是植物生命活动最强烈的时期,种子发芽在某种程度上直接影响作物的生长发育^[19]。有研究报道^[20],作为占全球作物种植面积1/4的小麦,其产量会直接影响全球经济。在Cd污

收稿日期:2021-04-22;修回日期:2021-06-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41801086)

作者简介:张珂(1988—),女,河南省泌阳县人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为恢复生态学。E-mail:zkecolgy@163.com

染日益严重的情况下,研究其对小麦种子在萌发阶段的影响非常重要。高汝勇^[21]认为,Cd 胁迫质量浓度在 80 mg/L 时可显著抑制小麦种子的发芽率,且随 Cd 胁迫质量浓度增大,小麦种子发芽率呈降低趋势;曹丹等^[22]认为,Cd 胁迫质量浓度在 40 mg/L 时,对徐麦 33 抑制最强;张珂等^[23]研究表明,Cd 胁迫质量浓度在 20 mg/L 和 50 mg/L 时对小麦种子的发芽势、发芽率及发芽指数促进作用最大。目前,Cd 胁迫对小麦种子萌发及生长特性的研究主要集中在对单一品种的研究,而对小麦种子萌发期耐 Cd 性综合评价的报道较少。基于此,本研究拟以 4 个不同品种小麦种子为实验材料,研究重金属 Cd 在不同胁迫质量浓度下对不同品种小麦种子萌发及幼苗生长的影响,并通过隶属函数法对具有高耐 Cd 性的小麦品种进行评价,以为培育高质高产小麦提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

用 CdCl₂ (分析纯,上海阿拉丁公司产) 配制质量浓度分别为 0 mg/L (去离子水对照)、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、50 mg/L、100 mg/L、200 mg/L 的 Cd 溶液。供试小麦购买于河南省农业科学院,分别为郑麦 1354、周麦 27、周麦 30、郑麦 9023。

1.2 实验设计

挑选大小一致、健康、籽粒饱满的小麦种子,用体积分数为 2% 的 H₂O₂ 溶液浸泡 30 min 后,用去离子水反复冲洗 3~5 遍^[24]。为直接了解 Cd 对小麦种子萌发与吸涨过程的影响,将小麦种子放入去离子水中浸种 6 h,再将其摆放在铺有 2 层滤纸的培养皿(直径 9 cm)内,每皿摆放 10 粒。分别向培养皿中加入 3.5 mL 不同质量浓度的 Cd 溶液,每个处理重复 3 次,共 84 个培养皿。将培养皿置于 25 ℃、40% 相对湿度恒温培养箱中,于黑暗条件下培养 7 d。培养过程中,每天记录小麦种子萌发情况(胚芽达到种子长度的一半),于第 3 d 统计发芽势,第 7 d 统计发芽率,并用游标卡尺测定根长和芽长。培养过程中补充的 Cd 溶液根据预实验阶段结果确定,大致为:在未加滤纸和种子的情况下,向培养皿中加入去离子水,盖上盖,在与处理组实验条件相同的情况下,每隔

12 h 测定培养皿中剩余水的体积,间接计算出每 d 蒸发的水分量,约 1.0~1.4 mL。

1.3 测定方法

用下列各式计算相关指标。

$$\text{发芽势}(GV) = 3 \text{ d 内供试萌发种子数} / \text{供试种子总数} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率}(GR) = 7 \text{ d 内供试萌发种子数} / \text{供试种子总数} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数}(GI) = \sum (\text{第 } n \text{ 天的萌发数} / \text{对应的发芽天数}) \quad (3)$$

$$\text{活力指数}(VI) = \text{发芽指数} \times \text{胚芽长度} \quad (4)$$

1.4 耐 Cd 性综合评价

应用隶属函数法对 4 个品种小麦种子的萌发期耐 Cd 性进行综合评价。首先计算小麦种子的相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数、相对根长和相对芽长。利用隶属函数公式计算出以上指标在不同 Cd 质量浓度下的具体隶属函数值,并对不同 Cd 质量浓度下该指标的隶属函数值求平均值,最后再把每个品种各项指标的隶属函数值求平均值,根据最终隶属函数值大小确定小麦种子萌发期耐 Cd 毒性强弱,平均值越大,耐 Cd 性越强^[17]。计算公式如下:

$$\text{相对发芽势} = \text{镉处理发芽势} / \text{对照发芽势} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{相对发芽率} = \text{镉处理发芽率} / \text{相应对照发芽率} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{相对发芽指数} = \text{镉处理发芽指数} / \text{对照发芽指数} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{相对活力指数} = \text{镉处理活力指数} / \text{对照活力指数} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{相对根长} = \text{镉处理根长} / \text{对照根长} \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{相对芽长} = \text{镉处理芽长} / \text{对照芽长} \times 100\% \quad (10)$$

第 j 个指标的隶属函数公式为:

$$\mu(x_j) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (11)$$

其中, X 为某 Cd 质量浓度下供试小麦种子第 j 个指标的测定值, X_{\max} 和 X_{\min} 分别为相应指标的最大值和最小值。

1.5 数据分析

采用 SPSS16.0 软件进行单因素 ANOVA 分析,

数据以(平均值±标准差)表示。不同品种小麦的各指标采用 SPSS16.0 软件进行双变量相关性分析,其中相关系数为皮尔逊相关系数,显著性检验为双尾检验。

2 结果与分析

2.1 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子发芽势和发芽率的影响分析

种子的发芽势、发芽率等指标是衡量种子发芽能力的重要参数^[25-26]。有研究表明^[27-29],重金属 Cd 胁迫对小麦种子萌发及幼苗生长具有“低浓度促进、高浓度抑制”的影响,主要原因是种子在受到 Cd 胁迫后,一方面会产生反馈效应,表现为种子的新陈代谢能力增强;另一方面,Cd 胁迫刺激相关酶的活性进而促使根尖细胞分裂,作为补偿性生长,在低浓度 Cd 胁迫时会促进种子萌发,但胁迫质量浓度过高则对种子产生毒害作用,进而抑制种子萌发^[30-31]。不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子发芽

势、发芽率的影响见表 1 和表 2。

由表 1 可见,与对照组相比,Cd 胁迫质量浓度为 5~100 mg/L 增加了郑麦 1354 的发芽势,且 Cd 胁迫质量浓度为 5 mg/L 和 50 mg/L 时达到最高(93%);周麦 27 的发芽势在 Cd 胁迫下均高于对照组,但随 Cd 胁迫质量浓度的增加表现出先升高后降低的趋势,且在 Cd 胁迫质量浓度为 20 mg/L 时发芽势达到最高(77%);与对照组相比,周麦 30 和郑麦 9023 的发芽势在 5~20 mg/L 的 Cd 胁迫质量浓度下表现出减小的趋势,周麦 30 的发芽势在 Cd 胁迫质量浓度为 5 mg/L 时显著降低($P<0.05$),但随着 Cd 胁迫质量浓度的升高,周麦 30 和郑麦 9023 的发芽势均在 Cd 胁迫质量浓度为 50 mg/L 时达到最高,分别为 47%和 77%。此外,当 Cd 胁迫质量浓度升高至 200 mg/L 时,周麦 30 的发芽势显著降低($P<0.05$),而郑麦 9023 的发芽势在 100 mg/L 和 200 mg/L 时均显著降低($P<0.05$)。

由表 2 可见,郑麦 1354 的发芽率在不同 Cd 胁

表 1 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子发芽势的影响

Table 1 Effects of different Cd concentrations on the seed germination potential of different types of wheat %

Cd 胁迫质量浓度/(mg·L ⁻¹)	郑麦 1354	周麦 27	周麦 30	郑麦 9023
0	77±0.12 ^a	39±0.14 ^b	40±0.10 ^a	73±0.03 ^a
5	93±0.07 ^a	63±0.12 ^a	27±0.07 ^b	70±0.06 ^a
10	83±0.12 ^a	73±0.07 ^a	33±0.15 ^a	63±0.09 ^a
20	87±0.03 ^a	77±0.09 ^a	20±0.12 ^a	53±0.09 ^a
50	93±0.07 ^a	67±0.13 ^a	47±0.09 ^a	77±0.07 ^a
100	80±0.15 ^a	63±0.07 ^a	43±0.03 ^a	43±0.09 ^b
200	50±0.06 ^b	60±0.06 ^a	23±0.03 ^b	43±0.09 ^b
<i>F</i>	2.35	1.50	1.28	3.40
<i>P</i>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

注:同一列不同字母表示该列不同处理之间 5%水平显著性差异,下同。

表 2 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子发芽率的影响

Table 2 Effects of different Cd concentrations on the seed germination percentage of different types of wheat %

Cd 胁迫质量浓度/(mg·L ⁻¹)	周麦 1354	周麦 27	周麦 30	郑麦 9023
0	87±0.07 ^a	93±0.03 ^a	90±0.00 ^a	90±0.06 ^a
5	97±0.03 ^a	97±0.03 ^a	87±0.07 ^a	90±0.10 ^a
10	90±0.10 ^a	97±0.03 ^a	87±0.13 ^a	93±0.03 ^a
20	90±0.00 ^a	100±0.00 ^a	93±0.07 ^a	87±0.03 ^a
50	97±0.03 ^a	93±0.03 ^a	90±0.06 ^a	97±0.03 ^a
100	97±0.03 ^a	83±0.12 ^a	90±0.00 ^a	57±0.12 ^b
200	93±0.03 ^a	83±0.09 ^a	50±0.12 ^b	57±0.03 ^b
<i>F</i>	0.61	1.14	3.68	6.43
<i>P</i>	>0.05	>0.05	<0.05	<0.01

迫质量浓度下均高于对照组,且在 Cd 胁迫质量浓度为 5 mg/L、50 mg/L 和 100 mg/L 时达到最大(97%);周麦 27 的发芽率随 Cd 胁迫质量浓度的增加表现出先增加后降低的特征,且在 Cd 胁迫质量浓度为 20 mg/L 时发芽率达到最高(100%);Cd 胁迫质量浓度为 20 mg/L 时对周麦 30 发芽率的促进作用最明显(93%);Cd 胁迫质量浓度为 50 mg/L 时,郑麦 9023 的发芽率达到最高(97%)。

2.2 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子发芽指数和活力指数的影响

发芽指数是检验种子质量的重要指标,而活力指数能够反映种子的品质^[32-33]。不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子发芽指数和活力指数的影响见表 3 和表 4。由表 3 可知,与对照组相比,郑麦 1354 和周麦 27 的发芽指数在不同 Cd 胁迫质量浓度下差异不显著($P>0.05$),但随 Cd 胁迫质量浓度的增加,郑麦 1354 和周麦 27 的发芽指数均呈现先升高后降低的趋势,且在 Cd 胁迫质量浓度为 5~100 mg/L 时均高于对照组。在 Cd 胁迫质量浓度为 50 mg/L 时,

郑麦 1354 的发芽指数最大,为 16.29;在 Cd 胁迫质量浓度为 10 mg/L 时,周麦 27 的发芽指数最大,为 12.76。周麦 30 和郑麦 9023 在 Cd 胁迫质量浓度为 5~20 mg/L 时,发芽指数均低于对照组,这与其发芽势的变化规律一致。周麦 30 和郑麦 9023 的发芽指数分别在 Cd 胁迫质量浓度为 100 mg/L 和 50 mg/L 时达到最高。

由表 4 可知,不同品种小麦种子的活力指数在不同 Cd 胁迫质量浓度下均差异显著($P<0.01$)。郑麦 1354 和周麦 27 的活力指数随 Cd 胁迫质量浓度的增加先增加后降低,且分别在 Cd 胁迫质量浓度为 5 mg/L 和 10 mg/L 时达到最大,分别为 49.54 和 51.24。与对照组相比,周麦 30 和郑麦 9023 的活力指数在 Cd 胁迫下均显著降低($P<0.01$)。这一方面表明不同品种小麦种子对不同 Cd 胁迫质量浓度的响应不同,另一方面表明周麦 30 和郑麦 9023 具有较差的耐 Cd 性,可见在对 Cd 污染程度不同的土壤进行耕作时选择小麦种子的必要性。

表 3 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子发芽指数的影响

Table 3 Effects of different Cd concentrations on the seed germination index of different types of wheat

Cd 胁迫质量浓度/(mg·L ⁻¹)	郑麦 1354	周麦 27	周麦 30	郑麦 9023
0	12.57±2.20 ^a	8.19±1.34 ^a	8.62±0.66 ^a	11.95±0.66 ^{ab}
5	15.79±0.70 ^a	11.31±0.78 ^a	7.17±0.88 ^a	11.59±1.08 ^{ab}
10	13.30±2.00 ^a	12.76±1.14 ^a	7.78±1.17 ^a	10.98±0.67 ^{ab}
20	15.49±0.44 ^a	12.67±0.88 ^a	7.19±1.40 ^a	9.86±0.68 ^{abc}
50	16.29±0.99 ^a	11.73±1.27 ^a	8.97±1.45 ^a	13.23±0.72 ^a
100	15.19±2.11 ^a	10.36±1.40 ^a	9.30±0.13 ^a	6.35±2.17 ^c
200	9.41±0.92 ^a	9.95±0.74 ^a	5.53±1.16 ^a	7.52±0.87 ^{bc}
<i>F</i>	2.64	2.17	1.50	5.07
<i>P</i>	>0.05	>0.05	>0.05	<0.01

表 4 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦种子活力指数的影响

Table 4 Effects of different Cd concentrations on the seed vigor index of different types of wheat

Cd 胁迫质量浓度/(mg·L ⁻¹)	郑麦 1354	周麦 27	周麦 30	郑麦 9023
0	38.02±9.23 ^{ab}	20.66±5.18 ^{bc}	34.36±3.50 ^a	42.51±5.43 ^a
5	49.54±5.34 ^a	40.48±5.38 ^{ab}	19.61±3.27 ^{abcd}	36.34±1.70 ^a
10	35.61±10.27 ^{ab}	51.24±9.98 ^a	29.81±6.17 ^{ab}	33.49±3.61 ^a
20	39.83±2.92 ^{ab}	38.81±6.42 ^{ab}	22.54±5.89 ^{abc}	31.09±2.37 ^a
50	25.38±1.25 ^{abc}	33.11±6.64 ^{ab}	15.54±3.15 ^{bcd}	32.59±3.79 ^a
100	19.06±4.46 ^{bc}	9.87±0.69 ^c	9.07±0.18 ^{cd}	10.61±6.91 ^b
200	6.25±1.07 ^c	7.88±1.05 ^c	3.81±1.00 ^d	6.54±0.35 ^b
<i>F</i>	5.95	7.81	7.74	11.37
<i>P</i>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

2.3 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦幼苗生长的影响

根系是植物吸收水分和养分的重要器官, Cd 在植物体内也多积累于根部^[34]。研究发现, 重金属离子可固定于植物根细胞壁中的交换位点, 进而对细胞内染色体及核仁进行破坏, 且随着重金属离子固定量的增加, 破坏程度也增加, 直至抑制植物根系的生长^[35-36]。在本研究中, 不同 Cd 胁迫质量浓度对小麦幼苗生长的影响如图 1—3 所示。可见, 由图 1—3 随着 Cd 胁迫质量浓度的增加, 郑麦 1354 和周麦 27 的根长均呈现先升高后降低的趋势, 说明低质量浓度 Cd 胁迫可能导致植物代谢失衡、刺激小麦根尖分裂进而促进种子根系的补偿性生长, 而高质量浓度的 Cd 极易导致作物产生化学物质, 危害其生长发育。Cd 胁迫质量浓度为 5 mg/L 时郑麦 1354 的根长最长(6.03 cm), Cd 胁迫质量浓度为 10 mg/L 时周麦 27 的根长最长(5.38 cm)。与对照组相比, 周麦 30 和郑麦 9023 的根长随着 Cd 胁迫质量浓度的增加呈现出降低的趋势和不同程度的抑制作用, 分

别在 Cd 胁迫质量浓度大于 20 mg/L 和 50 mg/L 时, 根长受到显著抑制($P < 0.05$)。这与鱼小军等^[37]的研究结果一致。

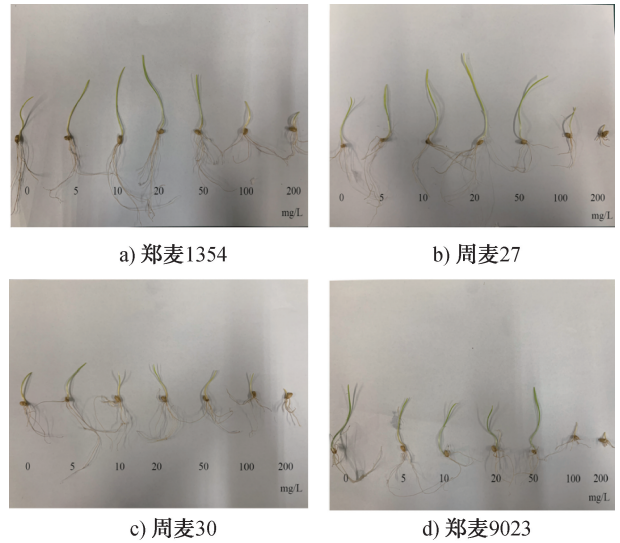


图 1 不同 Cd 胁迫质量浓度对不同品种的小麦幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of different Cd concentrations on seedling growth of different types of wheat

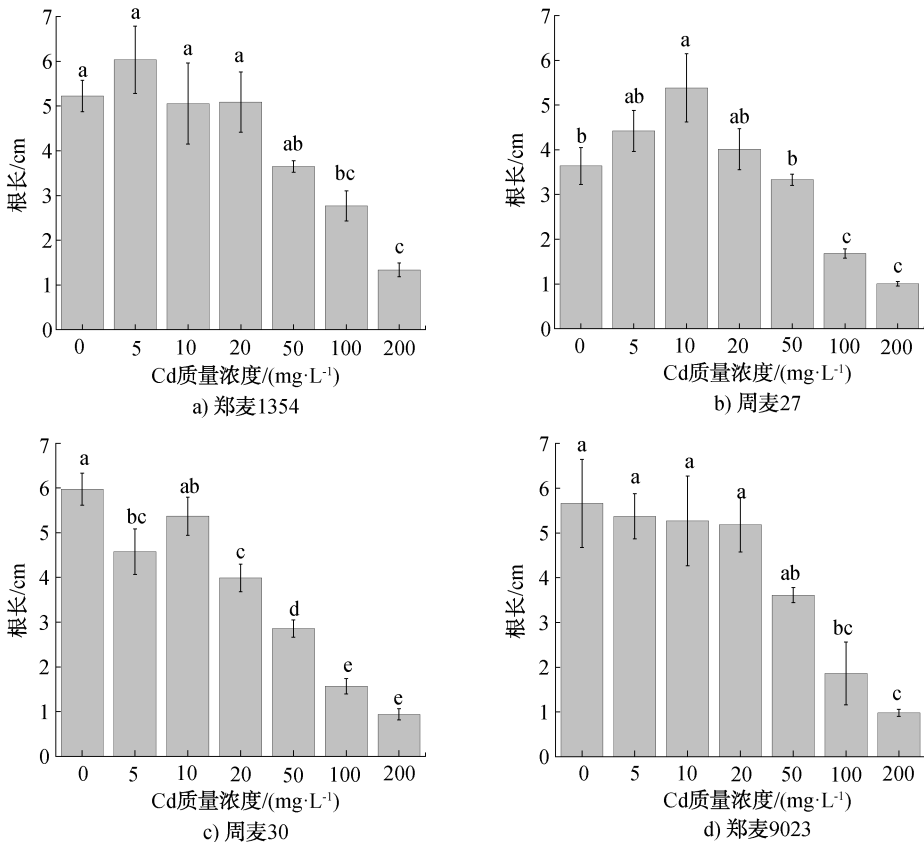


图 2 不同 Cd 胁迫质量浓度对不同品种小麦种子根长的影响

Fig. 2 Effects of different Cd concentrations on the seed root length of different types of wheat

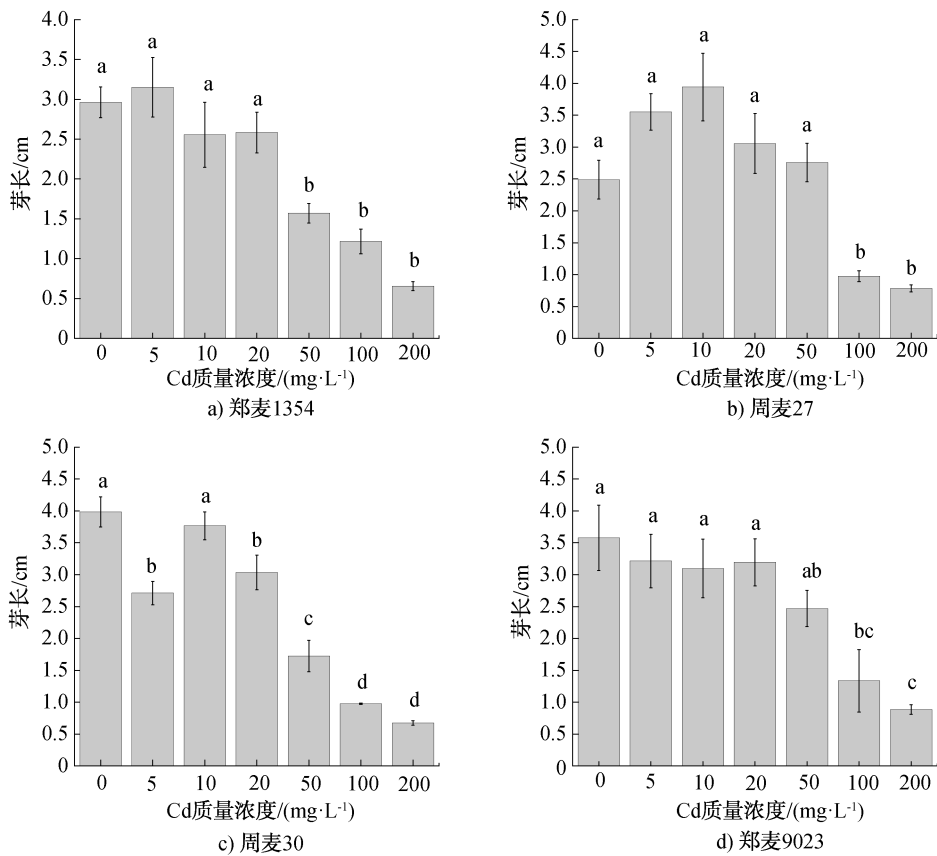


图3 不同Cd胁迫质量浓度对不同品种小麦种子芽长的影响

Fig. 3 Effect of different Cd concentrations on the shoot length of different types of wheat

芽长是鉴定幼苗抗逆性的重要指标。白哲等^[38]研究发现,低质量浓度Cd胁迫对芽长的影响尚未知,但高质量浓度Cd胁迫可诱发高活性氧自由基导致过氧化现象,从而对芽的生长具有抑制作用。在本研究中,不同品种小麦在Cd胁迫作用下芽长变化趋势与根长变化趋势基本一致(见图3)。郑麦1354在Cd胁迫质量浓度为5 mg/L时芽长达到最长(3.15 cm),周麦27的芽长随Cd胁迫质量浓度变化呈现“低促高抑”的趋势,且在Cd胁迫质量浓度为10 mg/L时促进作用最大(3.94 cm)。与对照组相比,周麦30和郑麦9023芽长在Cd胁迫下表现出不同程度的抑制作用,其中Cd胁迫质量浓度大于50 mg/L时,周麦30和郑麦9023的芽长均受到显著抑制($P < 0.05$)。这说明不同品种小麦种子对不同Cd胁迫质量浓度的耐受能力不同。

2.4 不同品种小麦种子耐Cd性综合评价结果

在小麦种子萌发期,以不同指标评价其在Cd胁迫下的耐受能力时,由于小麦种子萌发及生长特

征对Cd胁迫的响应不完全一致,仅用单一指标难以全面准确地反映其耐Cd性的强弱。刘大林等^[39]研究发现,不同指标评价不同植物在重金属胁迫下的耐受结果不完全一致。基于此,本研究首先对所测定的小麦种子在萌发期的不同指标与Cd胁迫质量浓度进行皮尔逊相关性分析,结果如表5所示。由表5可见,所有指标的皮尔逊相关性均达到显著水平。再对相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数、相对根长和相对芽长进行隶属函数值的计算,结果如表6所示。由表6可见,各个品种小麦种子的平均隶属函数值大小顺序为周麦27 > 郑麦1354 > 郑麦9023 > 周麦30;周麦27的平均隶属函数值最大,为0.55,说明其耐Cd性最强。由于小麦萌发后的生长状况对于耐镉品种的优选非常重要,因此,采用相对根长和相对芽长这两项指标进行平均隶属函数值的计算,所得结果的大小顺序同前,周麦27的平均隶属函数值以0.53位居第一,这与表5中皮尔逊相关性达显著水平的所有指标结果一

表5 小麦种子萌发指标与 Cd 质量浓度之间的皮尔逊相关性影响

Table 5 Pearson correlation between t indexes of different kinds of wheat seed and Cd concentration

萌发指标	发芽势	发芽率	发芽指数	活力指数	根长	芽长
发芽势	1	0.392**	0.904**	0.711**	0.465**	0.505**
发芽率		1	0.661**	0.422**	0.478**	0.398**
发芽指数			1	0.733**	0.551**	0.551**
活力指数				1	0.878**	0.939**
根长					1	0.953**
芽长						1

注:**表示显著相关。

表6 小麦种子萌发指标对 Cd 的耐性隶属函数值

Table 6 Membership function value of Cd tolerance of different types of wheat

品种名称	相对发芽势	相对发芽率	相对发芽指数	相对活力指数	相对根长	相对芽长	平均隶属函数值
郑麦 1354	0.61	0.50	0.54	0.55	0.55	0.48	0.54 ^a /0.52 ^b
周麦 27	0.61	0.45	0.55	0.61	0.50	0.56	0.55 ^a /0.53 ^b
周麦 30	0.42	0.44	0.44	0.50	0.46	0.44	0.45 ^a /0.45 ^b
郑麦 9023	0.44	0.57	0.67	0.50	0.44	0.50	0.51 ^a /0.47 ^b

注:^a为各品种小麦种子所有萌发指标的平均隶属函数值,^b为各品种小麦种子相对根长和相对芽长的平均隶属函数值。

致,均为周麦 27 耐 Cd 性最强。

3 结论

本文以郑麦 1354、周麦 27、周麦 30、郑麦 9023 为研究对象,研究了不同质量浓度 Cd 对不同品种小麦种子萌发及幼苗生长的影响,结论如下:郑麦 1354 的发芽指数和活力指数均随着 Cd 胁迫质量浓度的增加表现出先升高后降低的趋势;Cd 胁迫质量浓度为 5 mg/L 时对芽长和根长的促进作用最明显,分别为 3.15 cm 和 6.03 cm,体现了低质量浓度 Cd 胁迫能提高种子的新陈代谢活动以促进种子的生长。周麦 27 的发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数随 Cd 胁迫质量浓度的增加均表现出“低促高抑”的变化趋势,且均在 Cd 胁迫质量浓度为 20 mg/L 时发芽势和发芽率促进最大,表明低质量浓度 Cd 胁迫会促进种子萌发,高质量浓度的 Cd 胁迫会对种子产生毒害作用进而抑制种子萌发。周麦 30 和郑麦 9023 的发芽势和发芽指数均在 5~20 mg/L 质量浓度的 Cd 胁迫下表现出减小的趋势,与对照组相比,这两个品种的芽长和根长在不同质量浓度的 Cd 胁迫下均低于对照组。对 4 种小麦种子进行皮尔逊相关性分析,所测定的所有指标均达到显著水平;隶属函数值的计算结果显示,周麦 27 的耐 Cd 性最强,且具备高发芽率,可作为修复重金属 Cd 污染土壤的小麦推荐

品种。

参考文献:

- [1] GRANT C A, CLARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2/3):301-310.
- [2] 崔祥芬,张琴,王晋昆,等. 中国稻田土壤镉污染及务农性镉暴露概率风险评估[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8):3878-3886.
- [3] YANG S Y, ZHAO J, CHANG S X, et al. Status assessment and probabilistic health risk modeling of metals accumulation in agriculture soils across China: A synthesis [J]. *Environment International*, 2019, 128:165-174.
- [4] HUANG Y, WANG L Y, WANG W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 651(2):3034-3042.
- [5] LU C N, ZHANG L X, TANG Z, et al. Producing cadmium-free Indica rice by overexpressing OsHMA₃ [J]. *Environment International*, 2019, 126:619-626.
- [6] 程六龙,黄永春,王常荣,等. S-烯丙基-L-半

- 胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 3037-3045.
- [7] 中华人民共和国环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. (2014-04-17) [2021-04-22]. <http://www.gov.cn/footer/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>.
- [8] SINGH P, SINGH I, SHAH K. Alterations in antioxidative machinery and growth parameters upon application of nitric oxide donor that reduces detrimental effects of cadmium in rice seedlings with increasing days of growth[J]. South African Journal of Botany, 2020, 131: 283-294.
- [9] ISMAEL M A, ELYAMINE A M, ZHAO Y Y, et al. Can selenium and molybdenum restrain cadmium toxicity to pollen grains in Brassica napus[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(8): 2163.
- [10] 薛晨阳, 高英美, 曲波. 镉胁迫对瘤突苍耳、苍耳及其杂合体种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 345-355.
- [11] 姜艺, 黄琳丽. 镉胁迫对植物的影响探究[J]. 南方农业, 2020, 14(30): 138-139.
- [12] CHEN Q, LU X Y, GUO X R, et al. Differential responses to Cd stress induced by exogenous application of Cu, Zn or Ca in the medicinal plant catharanthus roseus[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 157: 266-275.
- [13] ADIL M F, SEHAR S, CHEN G, et al. Cadmium-zinc cross-talk delineates toxicity tolerance in rice via differential genes expression and physiological/ultrastructural adjustments[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 190: 110076.
- [14] URAGUCHI S, MORI S, KURAMATA M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2677-2688.
- [15] HE S Y, YANG X E, HE Z L, et al. Morphological and physiological responses of plants to cadmium toxicity: A review[J]. Pedosphere, 2017, 27(3): 421-438.
- [16] GOUIA H, GHORBAL M H, MEYER C. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean[J]. Plant Physiol Biochem, 2000, 38(7/8): 629-638.
- [17] 刘胜然, 王铁宇, 汤洁, 等. 典型城市单元的土壤重金属溯源方法与实证研究[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1278-1289.
- [18] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7921-7929.
- [19] 祝社民. 镉胁迫对小麦种子萌发特性的影响[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(12): 51-52.
- [20] 张雪梅, 李婷, 涂洋, 等. 一个小麦中水稻根系直系同源基因的分子鉴定及表达分析[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(6): 645-653.
- [21] 高汝勇. 镉胁迫对小麦种子发芽的影响[J]. 现代农村科技, 2020(11): 66-67.
- [22] 曹丹, 强承魁, 白耀博, 等. 小麦种子萌发对镉胁迫的生理响应[J]. 现代化农业, 2017(12): 17-19.
- [23] 张珂, 厉萌萌, 刘德权, 等. 镉胁迫对小麦、玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2019, 38(5): 90-94.
- [24] LIAN J P, WU J N, XIONG H X, et al. Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 121620.
- [25] 万雅雯, 傅华君, 时培建, 等. 变温对毛竹种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 97-106.
- [26] 蒋怡, 敬璞. 热风干燥温度对南瓜子种子活力影响的研究[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 49-55.
- [27] 保琼莉, 唐一然, 保万魁, 等. 镉对不同品种苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1695-1705.
- [28] 董肖昌. Cd²⁺胁迫对小麦苗期生长性状的影响

- 及其QT定位[D].泰安:山东农业大学,2012.
- [29] 吴秀宁,于冰,张军,等. Cd胁迫对不同类型小麦幼苗生长及光合生理特性的影响[J]. 陕西农业科学,2020, 66(9): 11-14.
- [30] 王宁,姚晨,贾瑞,等. 镉胁迫对苗期小麦镉吸收及其根际细菌群落的影响[J]. 河南农业大学学报,2021,55(3): 414-421.
- [31] 马文丽,金小弟,王转花. 镉对乌麦种子萌发幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 55-59.
- [32] 徐宁伟,路斌,高慧,等. 盐胁迫对两种苋科植物种子萌发的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021,35(8):138-143.
- [33] 火旭堂,贾昊,曹兵. NaCl处理对4种牧草植物种子萌发的影响[J]. 草地学报,2019,27(4):1096-1101.
- [34] 许文花,杨蔚,段新慧,等. 铝胁迫对紫花苜蓿生长及根系发育的影响[J]. 草原与草坪, 2020,40(6):71-75.
- [35] 张春荣,夏立江,杜相革,等. 镉对紫花苜蓿种子萌发的影响[J]. 中国农学通报,2004, 20(5): 253-255.
- [36] 曾翔,张玉焯,王凯荣,等. 镉对水稻种子萌发的影响[J]. 应用生态学报,2007, 18(7): 1665-1668.
- [37] 鱼小军,张建文,潘涛涛,等. 铜、镉、铅对7种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草地学报,2015,23(4):793-803.
- [38] 白哲,董馨岚. 镉、锌胁迫对黑麦草种子萌发及幼苗生长特性的影响[J]. 福建农业科技, 2020(12):30-34.
- [39] 刘大林,邱伟伟,马晶晶,等. 不同苜蓿品种种子萌发期的耐盐性比较[J]. 草业科学,2009, 26(9):163-169.

Effects of cadmium on seed germination and seedling growth of different wheat varieties

ZHANG Ke^{1,2,3}, GAO Nan¹, ZHANG Lingji¹, LIU Kexin¹, LI Mengmeng¹,
WANG Kai¹, MA Chuang^{1,2,3}, ZHANG Hongzhong^{1,2,3}

1. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, He'nan Province, Zhengzhou 450001, China;

3. Center International Group Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract: Zhengmai 1354, Zhoumai 27, Zhoumai 30 and Zhengmai 9023 were selected as the research objects, and the effects of Cd with different concentrations (0 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L, 20 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 200 mg/L) on seed germination and seedling growth of different wheat varieties were studied by germination experiments of filter paper in culture dishes. The results showed that the germination potential, germination percentage, vigor index, root length and shoot length of Zhengmai 1354 reached the maximum when the concentration of Cd was 5 mg/L; The germination potential, germination percentage, germination index and vigor index of Zhoumai 27 increased at first and then decreased with the increase of Cd stress concentration. Both the germination potential and germination index of Zhoumai 30 and Zhengmai 9023 were lower than those of the control group under Cd stress concentration of 5~20 mg/L, meanwhile, the root length and shoot length of Zhengmai 9023 were significantly inhibited when Cd stress concentration was higher than 50 mg/L. The results of average value of subordinate function indicated that Zhoumai 27 had the highest Cd tolerance and high germination percentage (93%), which could be used as the best cultivar for Cd tolerance wheat.

Key words: cadmium; wheat; seed germination; seedling growth