

文章编号: 1672-3317(2024)06-0106-07

镉对7个南瓜杂交组合幼苗生长及镉积累特性的影响

张煜广¹, 陈瑞², 郭慧丹¹, 逯雪¹, 陈碧华^{1*}, 郭卫丽¹,
李庆飞¹, 刘振威¹, 陈学进¹, 李新峰¹

(1.河南科技学院 园艺园林学院, 河南 新乡 453003; 2.苏梅国立农业大学, 乌克兰 苏梅 40000)

摘要:【目的】选育耐镉南瓜砧木种质资源。【方法】基于基质盆栽试验, 研究不同浓度镉(Cd)胁迫(0、8、16 mg/L)对7个南瓜杂交组合幼苗生长及镉积累特性的影响, 以0 mg/L为对照(CK), 利用隶属函数综合评价南瓜不同杂交组合的Cd积累特性。【结果】在不同浓度的Cd胁迫下, “盐边-3×陵川 c1”、“河头 a2×041-1”的株高、干质量和鲜质量均显著低于CK, 而“360-3×041-1”与CK无显著差异。“360-3×041-1”的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性较高, 电导率较低。“360-3×041-1”、“盐边-4×陵川 c1”的地上部Cd量显著低于其他杂交组合, 且转移系数小, 对Cd的吸收积累能力较弱。隶属函数综合分析显示, 在8 mg/L的Cd胁迫下, 7个南瓜杂交组合的耐Cd性依次为: “360-3×041-1” > “盐边-4×陵川 c1” > “盐边-3×360-3” > “盐边-2×041-1” > “河头 a2×360-3” > “盐边-3×陵川 c1” > “河头 a2×041-1”; 在16 mg/L的Cd胁迫下, 7个南瓜杂交组合的耐Cd性依次为: “360-3×041-1” > “盐边-4×陵川 c1” > “盐边-3×360-3” > “河头 a2×360-3” > “盐边-3×陵川 c1” > “盐边-2×041-1” > “河头 a2×041-1”。【结论】“360-3×041-1”、“盐边-4×陵川 c1”、“盐边-3×360-3”对Cd胁迫的耐受性较强, 其中“360-3×041-1”在Cd胁迫下的长势最好, Cd转移系数最低, 可作为最优的耐镉砧木材料。

关键词: 镉胁迫; 生长生理; 转移系数; 隶属函数

中图分类号: Q945

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023473

张煜广, 陈瑞, 郭慧丹, 等. 镉对7个南瓜杂交组合幼苗生长及镉积累特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 106-112.
ZHANG Yuguang, CHEN Rui, GUO Huidan, et al. The impact of soil cadmium contamination on growth and cadmium accumulation in the seedlings of different pumpkin hybrid varieties[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 106-112.

0 引言

【研究意义】随着工业废水的排放、矿产资源的开采以及农业生产过程中化肥农药的不规范使用, 土壤重金属污染愈发严重^[1-3]。重金属Cd的点位超标率达到7.0%^[4], Cd毒性大、难降解、迁移性强^[5], 不仅会对农作物的生长产生不利影响^[6], 也会通过食物链进入人体^[7], 对人体健康造成威胁。【研究进展】南瓜因其根系发达, 抗逆性强, 常作为瓜类蔬菜嫁接砧木, 具有防止土传病害, 提高产量和品质^[8]、增强生物胁迫和非生物胁迫抵抗能力^[9]等优点。南瓜嫁接可以减少接穗植物体内重金属的积累^[10], 张媛媛^[11]研究显示, 嫁接可以抑制Cd向地上部的运输, 减少接穗中的Cd量。【切入点】黄瓜嫁接苗茎叶中Cd的积累主要取决于砧木的吸收和转运能力, 因此, 培

育对Cd耐性较强及转运能力弱的优良砧木对减少Cd污染尤为重要。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本试验以河南科技学院南瓜团队前期选育的7个南瓜杂交组合为材料, 研究7个杂交组合幼苗在不同浓度Cd胁迫(0、8、16 mg/L)下的生长和Cd积累特性, 利用隶属函数法综合评价7个南瓜杂交组合的生长生理指标、Cd积累和转移系数, 为耐镉优良砧木的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

7个南瓜杂交组合材料由河南科技学院南瓜课题组提供, 分别为“360-3×041-1”、“盐边-4×陵川 c1”、“盐边-3×360-3”、“盐边-2×041-1”、“盐边-3×陵川 c1”、“河头 a2×041-1”、“河头 a2×360-3”, 分别用Z1、Z2、Z3、Z4、Z5、Z6、Z7表示。

1.2 试验设计

试验于2023年2—5月在河南科技学院智能温室内进行。南瓜于2月19日催芽, 每个南瓜杂交组合材料选取70粒, 温汤浸种后放入人工培养箱内进行催芽(28±1℃), 露白后播种。2月21日进行播种,

收稿日期: 2023-10-11 修回日期: 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2004161, 32302559); 河南省大宗蔬菜产业技术体系建设项目(S2010-03-G-06)

作者简介: 张煜广(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail: 761273141@qq.com

通信作者: 陈碧华(1972-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail: 183363468@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

采用盆栽（盆底直径 7.5 cm，上口直径 10.5 cm，深度 9 cm）试验，基质按照草炭、蚯蚓粪、蛭石、珍珠岩质量比为 3:2:1:1 的比例配置。待南瓜两叶一心时实施 Cd 胁迫，设置 3 种 Cd 浓度，分别为 0、8、16 mg/L。将不同杂交组合按照设置好的浓度梯度分别胁迫 20 株，每次注射 10 mL 的 Cd 溶液至植株根系附近，每 3 d 注射一次，共注射 5 次，全部注射 15 d 后进行采样测定各项指标。

1.3 指标测定和分析方法

1.3.1 株高、茎粗、生物量

用卷尺测量南瓜幼苗的地上部高度，采用游标卡尺测量幼苗茎粗（茎基部至 2 片子叶 1/2 处）。将幼苗从土中完整挖出，用蒸馏水冲洗 3 遍，再用吸水纸吸干表面水分，用剪刀将幼苗从根颈部分开，地下部分为根，地上部分为茎和叶，分别称其鲜质量，放入烘箱中于 105 °C 杀青 30 min，再置于 70 °C 条件下烘干至恒质量，分别测定各部位干质量。

1.3.2 相对叶绿素量 (SPAD) 与根系活力

采用便携式叶绿素仪 SPAD-502 测定 SPAD，每种胁迫设置 3 次重复，每个重复选取 3 株，测定南瓜苗自下而上第 2 片真叶。采用 TTC 法测定根系活力^[12]，每种胁迫设置 3 次重复。

1.3.3 抗氧化酶活性与电导率

取南瓜苗自下而上第 2 片真叶进行超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)及电导率的测定，每种胁迫设 3 个重复，每个重复取 3 株幼苗。采用氮蓝四唑 (NBT) 还原法测定 SOD 活性，采用愈创木酚法测定 POD 活性，采用 H₂O₂ 法测定 CAT 活性^[13]，电导率测定参照 Dresler 等^[14]方法。

1.3.4 Cd 量与转移系数

取烘干后的南瓜幼苗根、茎和叶样品置于研钵中研磨，称取 0.2 g 磨碎的样品放入消解罐中，加入 10 mL 硝酸，置于 MASTER-4 微波消解仪内，温度设置为 180 °C，时间设置为 30 min，随后在 150 °C 电热板上进行赶酸，赶酸至近黄豆粒大小，用 0.2% 硝酸定容至 15 mL，使用火焰原子吸收分光光度计测定样品中的 Cd 量。计算植物地上部的转移系数 (TF)^[15]。

1.3.5 耐 Cd 性及 Cd 积累能力的综合评价

采用隶属函数值对耐 Cd 性进行综合评价，若所测各项指标与南瓜幼苗耐 Cd 性呈正相关，利用式 $R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 计算；反之，利用公式 $R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 计算。式中：X_i 为南瓜幼苗各项指标；X_{min} 为指标最小值；X_{max} 为指标最大值。得到的平均隶属函数数值越大，说明其生长状态越好，耐镉性越强。

1.4 数据统计和分析

使用 Excel 2021 和 DPS 7.55 进行数据分析，采用单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 检验比较差异显著性 ($P < 0.05$)，运用 Excel 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对不同杂交组合南瓜生长指标的影响

由表 1 可知，Cd 胁迫对南瓜幼苗不同部位生长的影响不同。在 2 种 Cd 浓度胁迫下，Z1 和 Z2 的株高均与 CK 无显著差异；Z3、Z4、Z7 的株高在 8 mg/L Cd 胁迫下均与 CK 无显著差异，而在 16 mg/L Cd 胁迫下显著低于 CK，分别降低了 15.7%、17.9%、12.4%；Z5、Z6 在 2 种 Cd 胁迫下均显著低于 CK，8 mg/L 的 Cd 胁迫下分别降低了 24.1%、43.3%，16 mg/L Cd 胁迫下分别降低了 30.2%、52.6%。在 2 种浓度 Cd 胁迫下，7 个杂交组合的茎粗与 CK 均无显著差异。

Z1、Z2、Z3 的地上部干质量和鲜质量在 2 种浓度 Cd 胁迫下均与 CK 无显著差异；Z4 在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下与 CK 无显著差异，而在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下显著降低；Z5、Z6 的地上部干质量和鲜质量在 2 种浓度 Cd 胁迫下均显著低于 CK，且 8 mg/L 与 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫之间无显著差异。Z1 的地下部干质量和鲜质量在 2 种浓度 Cd 胁迫下均与 CK 无显著差异；Z2、Z4、Z5、Z6 在 2 种浓度 Cd 胁迫下均存在不同程度的下降，整体下降幅度达到 20.10%~49.33%，且 8 mg/L 与 16 mg/L Cd 胁迫间无显著差异。综上所述，在 2 种浓度 Cd 胁迫下，Z5 和 Z6 杂交组合的生长受抑制程度较高，其耐 Cd 性弱于其他杂交组合；Z1 和 Z2 生长受抑制程度小，说明其具有较强的耐 Cd 性。

2.2 镉胁迫对不同杂交组合南瓜生理指标的影响

2.2.1 镉胁迫对不同杂交组合南瓜 SPAD 和根系活力的影响

由图 1 (a) 可知，7 个南瓜杂交组合的 SPAD 在 2 种浓度 Cd 胁迫下均有不同程度的降低。Z4、Z7 在 2 种浓度 Cd 胁迫下均与 CK 无显著差异；Z1、Z2、Z3、Z6 在 2 种浓度 Cd 胁迫下的 SPAD 均显著低于 CK，在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下整体下降 5.90%~22.54%，在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下整体下降 6.44%~24.14%。

由图 1 (b) 可知，7 个南瓜杂交组合的根系活力随着 Cd 胁迫浓度的升高呈下降趋势。在 2 种浓度 Cd 胁迫下，Z1、Z3、Z7 的根系活力与 CK 无显著差异；Z2、Z4 在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下与 CK 无显著差异，而在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下显著低于 CK；Z5、Z6 的根系活力在 2 种浓度 Cd 胁迫下均显著低于 CK，

在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下分别降低 25.0%、16.3%，综上所述，Z1、Z2、Z3 的 SPAD 和根系活力受抑制在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下分别降低了 23.0%、24.9%。程度小，说明其具有较强的耐 Cd 性。

表 1 不同浓度镉胁迫对南瓜不同杂交组合株高、茎粗、生物量的影响

Tab.1 Effects of different cadmium stress on plant height, stem diameter and biomass of different hybrid combinations of pumpkins

杂交组合	Cd 浓度/(mg·L ⁻¹)	株高/cm	茎粗/mm	地上部		地下部	
				鲜质量/g	干质量/g	鲜质量/g	干质量/g
Z1	0	5.25±0.46a	5.70±0.32a	15.80±1.33a	1.80±0.14a	3.44±0.26a	0.23±0.02a
	8	5.14±0.24a	5.39±0.13a	15.63±1.75a	1.66±0.46a	3.38±0.16a	0.23±0.03a
	16	5.09±0.14a	5.35±0.28a	14.56±2.02a	1.60±0.17a	3.42±0.28a	0.22±0.01a
Z2	0	5.14±0.09a	5.56±0.27a	16.84±1.68a	1.96±0.10a	3.59±0.15a	0.24±0.05a
	8	5.30±0.36a	5.48±0.51a	16.79±0.91a	1.88±0.22a	2.73±0.60b	0.18±0.01b
	16	5.07±0.57a	5.40±0.25a	17.45±1.49a	1.80±0.37a	2.72±0.05b	0.17±0.01b
Z3	0	5.20±0.29a	5.89±0.16a	17.41±0.94a	1.84±0.10a	3.43±0.26a	0.21±0.03a
	8	5.07±0.18a	5.25±0.08a	16.91±2.17a	1.82±0.13a	3.23±1.09a	0.18±0.04ab
	16	4.38±0.09b	5.32±0.51a	15.90±2.46a	1.80±0.23a	2.00±0.57a	0.14±0.03b
Z4	0	4.89±0.07a	4.99±0.11a	15.84±0.47a	1.94±0.16a	2.94±0.22a	0.21±0.02a
	8	4.54±0.15ab	4.88±0.04a	14.35±2.26a	1.79±0.34a	2.35±0.13b	0.17±0.04ab
	16	4.01±0.70b	4.65±0.36a	7.80±0.64b	0.78±0.13b	2.27±0.27b	0.14±0.01b
Z5	0	4.16±0.06a	5.34±0.11a	14.42±1.72a	1.59±0.32a	2.97±0.11a	0.21±0.01a
	8	3.14±0.17b	5.11±0.16a	8.75±1.51b	0.84±0.08b	2.34±0.14ab	0.15±0.01b
	16	2.90±0.55b	5.03±0.31a	7.50±1.50b	0.83±0.15b	1.79±0.73b	0.13±0.03b
Z6	0	5.07±0.22a	4.91±0.29a	13.89±0.62a	1.77±0.13a	3.31±0.26a	0.22±0.02a
	8	2.87±0.69b	4.82±0.08a	6.40±0.99b	0.69±0.12b	1.88±0.32b	0.11±0.01b
	16	2.40±0.12b	4.89±0.09a	5.77±0.51b	0.64±0.09b	2.05±0.23b	0.12±0.01b
Z7	0	5.46±0.26a	4.56±0.26a	13.87±1.53a	1.71±0.05a	3.21±0.19a	0.24±0.01a
	8	5.19±0.19ab	4.39±0.20a	11.90±1.01a	1.59±0.14a	2.27±0.33b	0.20±0.02b
	16	4.78±0.46b	4.39±0.12a	11.61±1.20a	1.36±0.11b	2.77±0.65ab	0.22±0.01ab

注 同一杂交组合不同字母表示不同胁迫间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

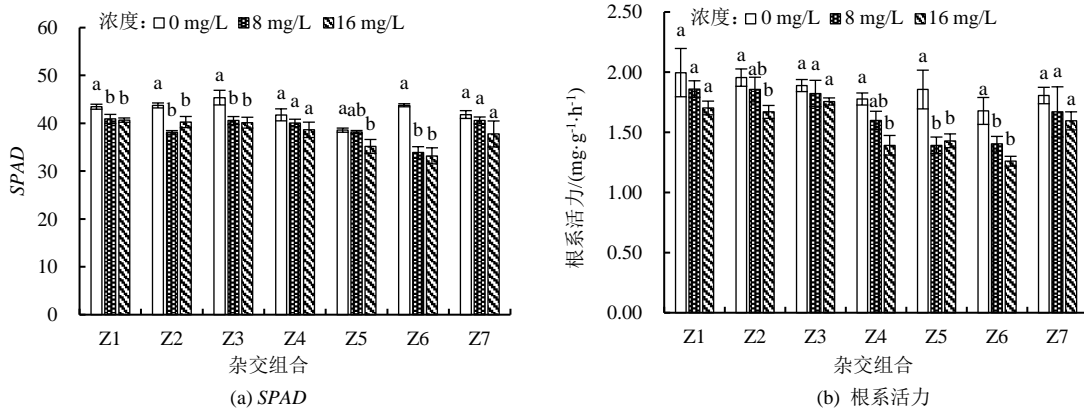


图 1 不同浓度镉胁迫对南瓜不同杂交组合的 SPAD 和根系活力的影响

Fig.1 Effects of different cadmium stress on SPAD and root activity of different hybrid combinations of pumpkins

2.2.2 Cd 胁迫对不同杂交组合南瓜抗氧化酶活性、相对电导率的影响

由图 2 可知，SOD、POD、CAT 活性随着 Cd 胁迫浓度的升高呈下降趋势。其中 Z1、Z2 的 SOD、POD 活性较高，在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下与 CK 无显著差异，而在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下显著低于 CK，分别下降了 20.97%~24.35%、8.55%~9.36%；Z1、Z3、Z4 的 CAT 活性较高，在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下与 CK 无显著差异，而在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下显著低于 CK，分别下降了 12.39%、26.83%、15.25%；Z6 的 SOD、POD、CAT 活性较低，在 2 种浓度 Cd 胁迫下

均显著低于 CK，分别下降 17.40%~35.38%、28.51%~37.81%、8.06%~28.03%。所有南瓜杂交组合叶片的电导率随胁迫浓度升高呈上升趋势，在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫时电导率达到最高。其中 Z1、Z2 的电导率较低，Z6、Z7 叶片的电导率较高。综合来看，Z6 的 SOD、POD、CAT、电导率在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下均与 CK 差异显著，其受伤害程度高，耐 Cd 性差；Z1、Z2 抗氧化酶活性在 Cd 胁迫下变化幅度较小且电导率增幅较低，说明其耐 Cd 胁迫和清除活性氧的能力较强。

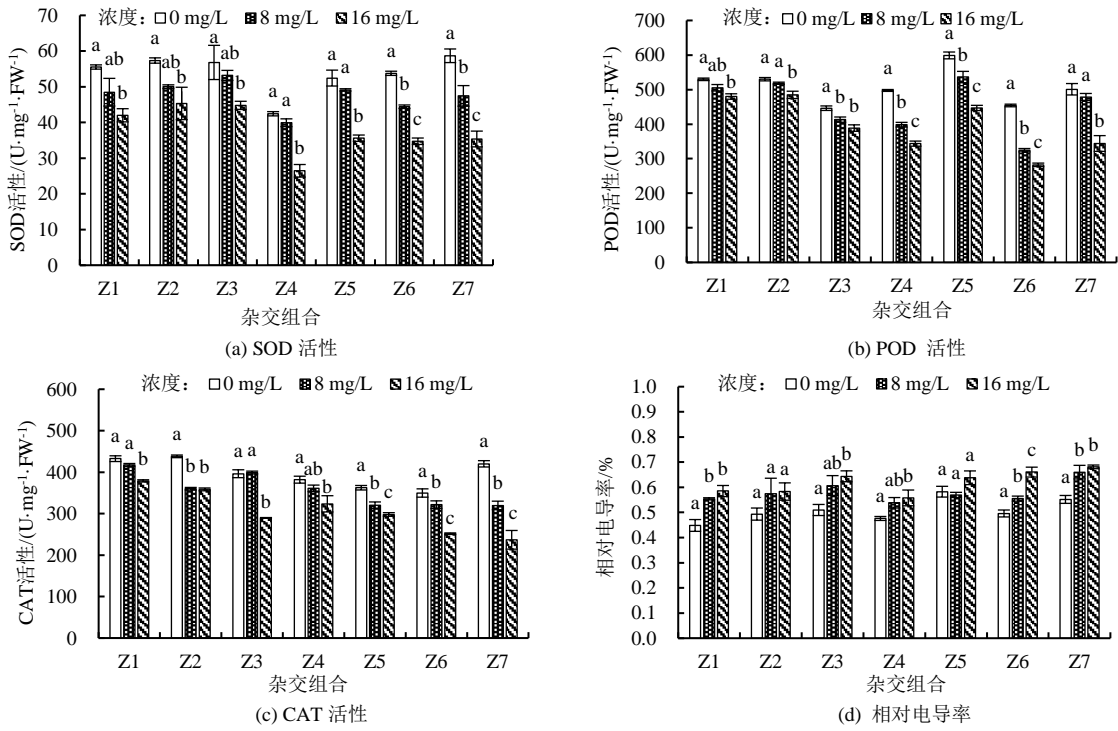


图 2 不同浓度 Cd 胁迫对南瓜不同杂交组合叶片 SOD、POD、CAT 活性和电导率的影响

Fig.2 Effects of different cadmium stress on SOD, POD, CAT activity and relative conductivity of different hybrid combinations of pumpkins

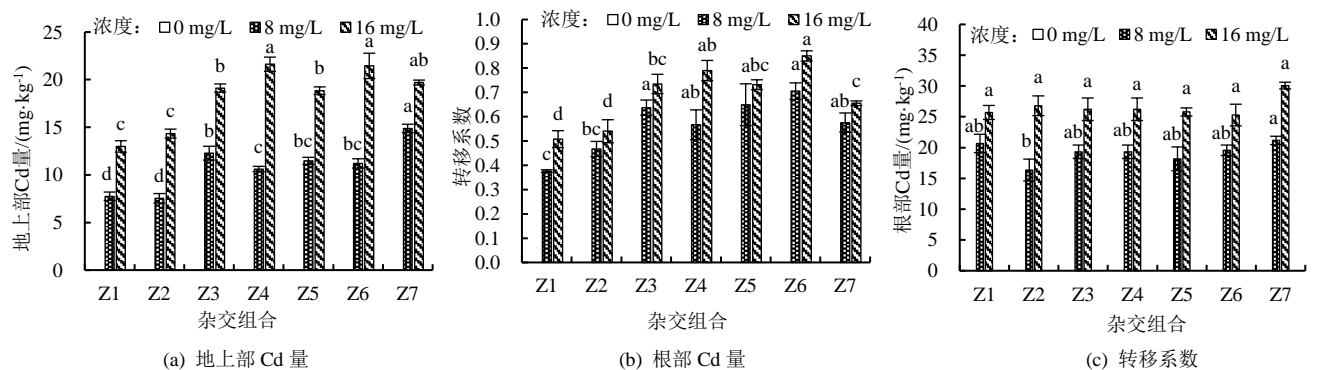
2.2.3 镉胁迫对黄瓜嫁接苗 Cd 量及转移系数的影响

由图 3 (a) 可知，不同杂交组合的南瓜幼苗地上部和根部 Cd 量均随 Cd 胁迫浓度的增加而上升，在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下，不同杂交组合的地上部 Cd 量表现为 Z2<Z1<Z4<Z6<Z5<Z3<Z7，其中 Z1 与 Z2 幼苗的地上部 Cd 量无显著差异，且显著低于其他杂交组合。

由图 3 (b) 可知，Z2 的根部 Cd 量最低，其余杂交组合无显著差异。在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下，不同杂交组合的地上部 Cd 量表现为 Z1<Z2<Z5<Z3<Z7<Z6<Z4，Z1 与 Z2 地上部 Cd 量无显著差异，并显著低于其他杂交组合；Z4、Z6 地上部 Cd 量较高，显著高于其余南瓜杂交组合。

由图 3 (c) 可知，不同杂交组合的南瓜幼苗对 Cd 的转移能力存在显著差异。在 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下，不同杂交组合幼苗 Cd 转移系数表现为 Z1<Z2<Z7<Z5<Z3<Z4<Z6，Z1 与 Z2 无显著差异，但显著低于 Z3、Z4、Z5、Z6、Z7。在 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下，不同杂交组合幼苗 Cd 转移系数表现为 Z1<Z2<Z7<Z5<Z3<Z4<Z6，其中 Z1 和 Z2 幼苗 Cd 转移系数较低，显著低于 Z3、Z4、Z5、Z6、Z7。

综上所述，在 2 个 Cd 浓度胁迫下，Z1 与 Z2 地上部 Cd 量低，且转移系数小，对 Cd 的吸收积累能力较弱。



注 图 3 中不同字母表示同一胁迫下不同杂交组合间差异显著 (P<0.05)，所有 CK 未监测到 Cd 量。

图 3 不同浓度 Cd 胁迫对南瓜不同杂交组合幼苗地上部、根部 Cd 量及转移系数

Fig.3 Cadmium content and transfer coefficient of different hybrid combinations of pumpkin seedlings under different cadmium stress

2.3 不同杂交组合南瓜的耐 Cd 性及 Cd 积累能力综合评价

不同杂交组合幼苗对 Cd 的耐性及积累能力由株高、茎粗、鲜质量、干质量、SPAD、根系活力、SOD、

POD、CAT、电导率、地上部 Cd 量、转移系数多个隶属函数值综合评价而来。由表 2、表 3 可知，在 8 mg/L 和 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下，Z1 的平均隶属函数值最高，其次是 Z2、Z3，说明 Z1 的耐 Cd 性最优，

地上部 Cd 积累量低,对 Cd 的吸收转移能力弱,是耐 Cd 杂交组合材料;而 Z5、Z6 的耐性较差,地上部 Cd 吸收能力强,不适宜作为耐 Cd 南瓜砧木材料。

表 2 8 mg/L 浓度 Cd 胁迫下南瓜不同杂交组合各指标的隶属函数分析

Tab.2 Membership function analysis of various indexes in different hybrid combinations of pumpkin under 8 mg/L cadmium stress

杂交组合	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
株高	0.98	0.88	0.95	0.72	0.05	0.00	1.00
茎粗	0.92	1.00	0.79	0.45	0.66	0.39	0.00
地上部鲜质量	0.99	0.88	1.00	0.76	0.22	0.00	0.52
地下部鲜质量	0.57	1.00	0.90	0.31	0.31	0.00	0.26
地上部干质量	1.00	0.81	0.95	0.93	0.13	0.00	0.76
地下部干质量	0.53	1.00	1.00	0.46	0.28	0.00	0.72
SPAD	1.00	0.60	0.95	0.88	0.61	0.00	0.96
根系活力	1.00	0.99	0.92	0.44	0.00	0.03	0.59
SOD	0.64	0.76	1.00	0.00	0.69	0.34	0.57
POD	0.85	0.92	0.42	0.35	1.00	0.00	0.73
CAT	1.00	0.41	0.81	0.42	0.00	0.02	0.00
相对电导率	0.87	0.71	0.44	1.00	0.74	0.86	0.00
地上部 Cd 量	0.97	1.00	0.35	0.58	0.46	0.50	0.00
根部 Cd 量	0.90	0.00	0.62	0.62	0.38	0.67	1.00
转移系数	1.00	0.69	0.10	0.44	0.06	0.00	0.03
平均值	0.88	0.78	0.75	0.56	0.37	0.19	0.48
排序	1	2	3	4	6	7	5

表 3 16 mg/L 浓度 Cd 胁迫下南瓜不同杂交组合幼苗各指标的隶属函数分析

Tab.3 Membership function analysis of various indexes in different hybrid combinations of pumpkin under 16 mg/L cadmium stress

杂交组合	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
株高	0.95	1.00	0.92	0.26	0.63	0.50	0.00
茎粗	0.95	1.00	0.92	0.26	0.63	0.50	0.00
地上部鲜质量	1.00	0.75	0.87	0.17	0.15	0.00	0.50
地下部鲜质量	0.57	1.00	0.13	0.30	0.00	0.16	0.60
地上部干质量	1.00	0.83	1.00	0.12	0.17	0.00	0.62
地下部干质量	0.48	0.97	0.23	0.23	0.10	0.00	1.00
SPAD	1.00	0.95	0.93	0.73	0.26	0.00	0.61
根系活力	0.89	0.83	1.00	0.27	0.34	0.00	0.67
SOD	0.82	1.00	0.97	0.00	0.48	0.44	0.47
POD	0.98	1.00	0.53	0.30	0.81	0.00	0.30
CAT	1.00	0.86	0.37	0.61	0.43	0.10	0.00
相对电导率	0.78	0.79	0.30	1.00	0.35	0.17	0.00
地上部 Cd 量	1.00	0.84	0.29	0.00	0.32	0.02	0.22
根部 Cd 量	0.09	0.32	0.20	0.20	0.11	0.00	1.00
转移系数	1.00	0.68	0.19	0.42	0.64	0.00	0.39
平均值	0.83	0.85	0.59	0.32	0.36	0.13	0.43
排序	2	1	3	6	5	7	4

3 讨论

植株生长状况是植物对逆境胁迫适应的综合体现。逆境环境对植物生长的抑制程度反映了植物对胁迫的耐性^[6]。Cd 胁迫会导致植株矮小、生长缓慢、生物量下降,还会导致叶片萎蔫^[7]。已有研究表明,随着 Cd 胁迫浓度的增加,西瓜幼苗的根系直径逐渐降低,植株株高、茎粗度、茎节数和叶片数均呈下降趋势^[8],这与本试验结果一致。本试验中,“盐边-3×陵川 c1”、“河头 a2×041-1”在 Cd 胁迫下的株高、干质量、鲜质量、相对叶绿素量显著降低,说明其

在 Cd 胁迫下的生长受到了抑制;“360-3×041-1”在 2 种浓度 Cd 胁迫下,株高、茎粗、干质量、鲜质量与 CK 无显著差异,而相对叶绿素量在 2 种浓度胁迫下分别降低了 5.9%、6.8%,降低幅度较小。表明不同杂交组合对 Cd 胁迫的耐受能力存在差异,可能与杂交组合本身的耐受性和适应性有关。

植物根系是最早感知 Cd 胁迫的部位。Cd 胁迫会限制根系细胞膜结构的功能,影响植物生长和发育。田小霞等^[9]研究发现,在 Cd 胁迫下,马蔺的根系活力显著降低。本试验中,“360-3×041-1”、“盐边-3×360-3”、“河头 a2×360-3”在 Cd 胁迫下的根系活力没有显著差异,说明这些杂交组合对 Cd 胁迫耐受能力较强。随着 Cd 胁迫浓度的增加,7 个杂交组合的根系活力呈下降趋势,进一步验证了根系活力的降低是植物对 Cd 胁迫的响应指标之一。在重金属胁迫下,植物会发生膜脂过氧化反应,产生大量活性氧,从而破坏细胞膜系统^[20],导致电导率增加。为了对抗这种损害,植物会产生一系列抗氧化酶,将活性氧分解,从而减轻重金属对植物的毒害作用^[21]。7 个杂交组合的 SOD、POD 以及 CAT 活性随着 Cd 浓度的增加呈下降趋势,与韩航等^[22]研究结果一致,说明 Cd 胁迫导致细胞膜的膜脂过氧化反应加剧,产生更多的活性氧,进而降低了膜保护酶的活性;在 2 种浓度 Cd 胁迫下,“360-3×041-1”与“盐边-4×陵川 c1”的 SOD、POD 与 CAT 下降幅度较小,酶活性较高。随着 Cd 浓度的增加,细胞膜的完整性受到破坏,导致酶活性下降和相对电导率增加。王慧慧等^[23]研究发现,在 Cd 胁迫下,“津油 108”和“青佳砧甲”地上部 Cd 量较低,属于低 Cd 积累材料,而“亮丽佳”、“黑籽南瓜”地上部 Cd 量较高,表现出很强的 Cd 吸收转移能力。本试验中,“360-3×041-1”、“盐边-4×陵川 c1”,“盐边-3×360-3”的地上部 Cd 量与转移系数均较低,因此可作为低 Cd 积累材料进一步研究;而“盐边-3×陵川 c1”、“河头 a2×041-1”地上部 Cd 量与转移系数均较高,具有较强的 Cd 吸收能力,不适宜作为低 Cd 积累材料研究。

谢婉莹等^[24]利用 9 个核桃品种的相对电导率、可溶性蛋白质、可溶性糖、SOD、POD、CAT 的隶属函数值综合比较了不同品种核桃的抗逆性。本试验综合比较了株高、茎粗、鲜质量、干质量、SPAD、根系活力、SOD、POD、CAT、相对电导率、地上部 Cd 量、根部 Cd 量及转移系数的隶属函数值,发现 2 个 Cd 浓度胁迫下的“360-3×041-1”的平均隶属函数值高于 0.85,优于其余杂交组合,其次是“盐边-4×陵川 c1”。而“河头 a2×041-1”在 2 个浓度的 Cd 胁迫下的平均隶属函数值均较低,低于 0.20,该杂交组合整体抗逆性较差,说

明其在 Cd 胁迫下的生长受到了抑制。

4 结论

1) “360-3×041-1”在 Cd 胁迫下的株高、茎粗、干质量、鲜质量与 CK 无显著差异, 生长受抑制程度小, 有较好的生长势, 且 SOD、POD、CAT 较高, 能有效地减少 Cd 的膜脂过氧化伤害。

2) “360-3×041-1”、“盐边-4×陵川 c1”、“盐边-3×360-3”的地上部 Cd 量少且转移系数低, 对 Cd 有较好的耐性。

3) “360-3×041-1”的 Cd 综合耐受性最强, 可作为耐 Cd 砧木材料。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- LIU Xiaoyang, BAI Zhongke, SHI Huading, et al. Heavy metal pollution of soils from coal mines in China[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(2): 1 163-1 177.
- 朱东海, 齐学斌, 吴海卿, 等. 赤泥对不同品种小麦吸收镉的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(S2): 152-154.
ZHU Donghai, QI Xuebin, WU Haiqing, et al. Effects of red mud on the absorption of Cd by different kinds of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(S2): 152-154.
- 滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(3): 101-109.
HUA Xiaozan, CHENG Bin, ZHAO Ruifen, et al. Pollution assessment and spatial distribution of heavy metals in the farmland soils of Taiyuan city[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(3): 101-109.
- 张平, 耿勤, 许超, 等. 含镉水灌溉对盆栽土壤镉及其在水稻中累积分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(7): 92-96.
ZHANG Ping, GENG Qin, XU Chao, et al. Effects of irrigation water with cadmium on cadmium contents in the potted soils and its accumulation in rice plants[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(7): 92-96.
- FU Xiaoping, DOU Changming, CHEN Yingxu, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 103-107.
- 李玉清, 周雪梅, 姜国辉, 等. 含镉水灌溉对水稻产量和品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(4): 120-123.
LI Yuqing, ZHOU Xuemei, JIANG Guohui, et al. Influence of irrigation with different concentrations of cadmium solution on rice yield and quality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(4): 120-123.
- 李乐乐, 刘源, 李宝贵, 等. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(8): 53-58, 72.
LI Lele, LIU Yuan, LI Baogui, et al. Screening of low-accumulation wheat varieties with cadmium[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 53-58, 72.
- 苗丽, 段颖, 王长林, 等. 中国南瓜对嫁接黄瓜产量与风味影响的综合评价[J]. *核农学报*, 2019, 33(10): 1 949-1 958.
MIAO Li, DUAN Ying, WANG Changlin, et al. Comprehensive evaluation of commodity fruit production and taste in grafted cucumber using *Cucurbita moschata* germplasms as rootstocks[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(10): 1 949-1 958.
- 田惠, 谢学文, 李焕玲, 等. 砧木南瓜种传细菌性果斑病的发生及防治[J]. *中国蔬菜*, 2014(5): 65-66.
- 邢乃林, 严蕾艳, 王毓洪, 等. 不同类型砧木嫁接对西瓜果实品质和镉含量的影响[J]. *江西农业学报*, 2022, 34(8): 17-21.
XING Nailin, YAN Leiyan, WANG Yuhong, et al. Effects of different types of rootstocks on fruit quality and cadmium content of grafted watermelon[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2022, 34(8): 17-21.
- 张媛媛. 重金属镉对黄瓜幼苗生理特性的影响及嫁接缓解镉毒害的生理机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
ZHANG Yuanyuan. Effect of cadmium on physiological characteristics of cucumber seedlings and physiological mechanisms of grafting to alleviate to cadmium toxicity[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- CAKMAK I, MARSCHNER H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves[J]. *Plant Physiology*, 1992, 98(4): 1 222-1 227.
- DRESLER S, HANAKA A, BEDNAREK W, et al. Accumulation of low-molecular-weight organic acids in roots and leaf segments of *Zea mays* plants treated with cadmium and copper[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36(6): 1 565-1 575.
- ZHANG Shirong, LIN Haichuan, DENG Liangji, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Siegesbeckia orientalis* L[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 133-139.
- 胡茜雅, 杨岑, 彭尽晖, 等. 镉胁迫对广西过路黄生长及叶片光合特性的影响[J/OL]. *分子植物育种*: 1-11[2024-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230628.1719.008.html>.
- 刘俊华, 陈印平, 赵西梅. 重金属铅胁迫对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *种子*, 2017, 36(11): 77-80.
LIU Junhua, CHEN Yinping, ZHAO Ximei. Effects of Pb stress on seed germination and seedling growth of cucumber[J]. *Seed*, 2017, 36(11): 77-80.
- 张涵洋, 李爱, 张卫华, 等. 镉胁迫对西瓜幼苗生长及其叶片解剖结构和生理特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(3): 401-409.
ZHANG Hanyang, LI Ai, ZHANG Weihua, et al. Effects of cadmium stress on the growth, leaf anatomical structure and physiological characteristics of *Citrullus lanatus* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(3): 401-409.
- 田小霞, 毛培春, 郭强, 等. 镉胁迫对马蔺根系活力和矿质营养元素吸收的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(9): 2 090-2 096.
TIAN Xiaoxia, MAO Peichun, GUO Qiang, et al. Effect of cadmium stress on root activity and mineral nutrient elements absorption of iris lacteal[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(9): 2 090-2 096.
- 翟夜雨, 黄五星, 袁岐山, 等. 植物镉毒害与硒对镉胁迫的缓解作用研究进展[J]. *河南农业大学学报*, 2023, 57(3): 372-382, 392.
ZHAI Yeyu, HUANG Wuxing, YUAN Qishan, et al. Research progress on plant cadmium toxicity and the alleviation effect of selenium on cadmium stress[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2023, 57(3): 372-382, 392.
- 赵慧博, 李丽丽, 梁塔娜, 等. 重金属铜、镉胁迫下植物响应的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(21): 14-16.
ZHAO Huibo, LI Lili, LIANG Tana, et al. Advances in plant response to heavy metal copper and cadmium stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(21): 14-16.
- 韩航, 陈雪娇, 侯晓龙, 等. Cd 胁迫对类芦生长及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(4): 647-653.
HAN Hang, CHEN Xuejiao, HOU Xiaolong, et al. Effects of cadmium stresses on growth and antioxidant activities of *Neyraudia reynaudiana*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 647-653.
- 王慧慧, 王晨, 张明华, 等. 砧用南瓜幼苗对镉的耐性和积累能力研究[J]. *西北植物学报*, 2018, 38(12): 2 257-2 266.
WANG Huihui, WANG Chen, ZHANG Minghua, et al. Study on tolerance and accumulation ability of cadmium in pumpkin seedlings for rootstocks[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(12): 2 257-2 266.
- 谢婉莹, 祁银燕, 刘小利, 等. 青海九个核桃新品种引种的抗寒性[J]. *北方园艺*, 2023(12): 29-36.
XIE Wanying, QI Yinyan, LIU Xiaoli, et al. Cold resistance of nine new walnut varieties introduced in Qinghai[J]. *Northern Horticulture*, 2023(12): 29-36.

The impact of soil cadmium contamination on growth and cadmium accumulation in the seedlings of different pumpkin hybrid varieties

ZHANG Yuguang¹, CHEN Rui², GUO Huidan¹, LU Xue¹, CHEN Bihua^{1*},
GUO Weili¹, LI Qingfei¹, LIU Zhenwei¹, CHEN Xuejin¹, LI Xinzhen¹

(1. School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Sumy National Agrarian University, Sumy 40000, Ukraine)

Abstract: **【Objective】** Soil contamination by cadmium (Cd) is a problem for agriculture production in many countries. One remediation method is to improve the tolerance of crops to Cd. In this paper, we investigate the tolerance of the seedlings of different pumpkin varieties to Cd contamination and Cd accumulation in the plants. **【Method】** The experiment compared seven pumpkin varieties: 360-3×041-1, Yanbian-4×Lingchuan1, Yanbian-3×360-3, Yanbian-2×041-1, Hetou a2×360-3, Yanbian-3×Lingchuan c1, and Hetou a2×041-1. They were all grown in pots repacked with soils contaminated by Cd at concentration of 0, 8 and 16 mg/L, respectively. During the experiment, we measured the growth, physiological traits of the plants, as well as Cd accumulation in the plants. **【Result】** ① Compared to the control without Cd contamination, Cd stress significantly reduced plant height, dry and fresh mass of the Yanbian-3×Lingchuan c1 and Hetou a2×041-1 varieties, but had no significant impact on the 360-3×041-1 variety. ② Regardless of Cd stress levels, the 360-3×041-1 had the highest activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT), and the lowest electrical conductivity. ③ The Cd content in the above-ground part of 360-3×041-1 and Yanbian-4×Lingchuan c1 was significantly lower than that in other varieties; their associated Cd transfer coefficient was small and the Cd accumulation was low. ④ Comprehensive analysis showed that in soil contaminated by Cd at concentration of 8 mg/L, the tolerance of the seven varieties to Cd was ranked in the order of 360-3×041-1>Yanbian-4×Lingchuan1>Yanbian-3×360-3>Yanbian-2×041-1>Hetou a2×360-3>Yanbian-3×Lingchuan c1>Hetou a2×041-1. In soil contaminated by Cd at concentration of 16 mg/L, their tolerance to Cd was ranked in the order of 360-3×041-1>Yanbian-4×Lingchuan c1>Yanbian-3×360-3>Hetou a2×360-3>Yanbian-3×Lingchuan c1>Yanbian-2×041-1>Hetou a2×041-1. **【Conclusion】** Comprehensive analysis shows that the varieties 360-3×041-1, Yanbian-4×Lingchuan c1 and Yanbian-3×360-3 were more tolerant to Cd stress, especially 360-3×041-1 which had the lowest cadmium transfer coefficient and can healthily grow in Cd contaminated soils.

Key words: cadmium stress; growth physiology; transfer coefficient; membership function

责任编辑: 韩 洋

(上接第 105 页)

Using remote sensing to study flooding and its detrimental impact in lowlands of the Grand Canal

WANG Dayong^{1,3}, GUAN Qinghua^{1,3*}, JIN Ruiqing², LIU Dan^{1,3}, DOU Junwei², CHEN Xuequn^{1,3}, FAN Mingyuan^{1,3}

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China; 2. Haihe River, Huaihe River and Xiaoqinghe River Basin Water Conservancy Management and Service Center of Shandong Province, Jinan 250014, China;

3. Shandong Province Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan 250014, China)

Abstract: **【Objective】** The Grand Canal is a complex hydraulic project in the eastern China. This paper studies the flooding and its detrimental impacts in the lowland areas of the canal. **【Method】** The research was conducted in the Pichang-Tanxin Plain, using multi-source remote sensing data and ground surveys to analyze flooding events. We calculated the normalized difference water body index (*NDWI*) and the normalized difference vegetation index (*NDVI*) before and after flooding to assess flood severity, impact on crop growth, as well as the efficacy of hydraulic facilities in mitigating flooding effects. **【Result】** The *NDVI* difference between 2004 and 2005 for crops in flooded and non-flooded areas was 0.5 and 0.25, respectively, indicating floodings detrimentally affected crop growth and development. *NDWI* analysis from 2003 to 2017 demonstrated that the Taierzhuang Control Gate project mitigated flooding impacts on nearby farmlands. Flooding also affected crops in non-inundated regions, with lowland crops more adversely impacted than those outside lowlands. The hydraulic facilities significantly reduced economic losses caused by flooding. **【Conclusion】** Remote sensing is an effective tool for monitoring inundated areas and assessing the consequences of flooding on crops. The construction of hydraulic facilities plays a crucial role in reducing the detrimental effects of flooding in lowland regions of the Grand Canal.

Key words: depressions along the Grand Canal; flooding characteristics; *NDWI*; *NDVI*; hydraulic facilities

责任编辑: 白芳芳