

6 个甘蓝型油菜品种的镉胁迫耐受性研究*

王建伟¹, 贺晓岚^{2**}

(1. 凯里学院 理学院, 贵州 凯里 556011; 2. 凯里学院 大健康学院, 贵州 凯里 556011)

[摘要] 为了探明甘蓝型菜品种对镉(Cd)富集能力的差异及其生理机制,以6个油菜品种为材料,进行镉胁迫(5 mg/kg Cd)处理,研究外源镉胁迫下油菜叶绿素含量和光合特性的影响。结果表明,镉胁迫降低了除广源 58 外,其余品种的叶绿素及全部品种的全胡萝卜素含量,降低了全部品种的光合速率,增加了全部品种的胞间 CO₂ 浓度。其中美油 88 的叶绿素 a 及光合速率降幅最大,而南油 868 的降幅最小。综上,美油 88 对 Cd 胁迫较为敏感,而南油 868 对 Cd 胁迫的适应性较强,属较耐 Cd 型。

[关键词] 镉胁迫; 光合特性; 油菜; 叶片色素

[中图分类号] S565 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5639 (2025) 06-0077-07

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2025.06.010

镉(cadmium, Cd)是植物非必需且毒性很强的重金属元素,具有移动性强,易被农作物吸收,并通过食物链危害人体健康的特性^[1]。近年来,由于工业“三废”,汽车尾气不合理排放与农药、化肥的不合理施用,大气、水、土壤污染日益严重^[2,3]。镉进入土壤后,首先对植物生长发育、生理生化、细胞超微结构、生物量和产量以及作物营养品质等方面均产生重要影响^[4],然后通过生物富集作用进入人体,主要蓄积于肾脏,对人体骨骼、肾、肝、免疫和生殖系统均有毒害作用,甚至可引发致癌、致畸、致突变作用^[5]。甘蓝型油菜属于十字花科芸薹属,是我国重要的油料作物之一,其生物量大、根系发达、适应性强。大量研究表明,生长于镉污染区的油菜,其籽粒里的镉含量极低,所产的菜油不存在消费风险^[6-9],具有修复土壤同时保持其经济效益的潜力,适宜作为超积累镉的生物资源加以挖掘^[6-9]。而不同油菜品种或基因型对 Cd 积累和耐受性存在差异^[10]。因此以不同油菜品种为材料,经镉胁迫后筛选耐镉品种具有十分重要的意义。

苗期生长状况是评价植物重金属耐性的重要指标^[11]。目前,研究者们已对多种作物,如玉米^[12]、水稻^[13]、糜子^[14]、辣椒^[15]和黑麦草^[16]等,开展了苗期耐镉性品种评价的研究,其中也包括了油菜。研究^[4]表明油菜遭受 Cd 胁迫后,植株会产生一系列生理生化变化,主要表现在植物细胞积累 ROS (Reactive Oxygen Specie),损伤蛋白质、核酸等生物大分子,破坏抗氧化系统,诱发膜脂过氧化伤害,诱导渗透调节物质合成,并影响光合作用。叶绿体中的叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,其含量在一定程度上可反映光合作用水平。油菜受 Cd 胁迫后,叶绿素 a、b 及叶绿素总含量均逐渐减少,光合性能下降,光合作用及呼吸作用等一系列生理生化过程发生紊乱,光合强度减弱^[17]。但目前关于镉胁迫对甘蓝型油菜,尤其是广适应性油菜品种的光合特征及耐镉性的影响尚不清楚。因此,本研究选择了具有抗病、抗倒、耐渍、高产、广适应性、株型紧凑、长势健旺、分枝力强等特性的甘蓝型油菜品种,从光合特性角度对其进行耐镉性对比,以期耐镉性油菜品种选择提供参考。

* [收稿日期] 2024-10-28

[作者简介] 王建伟,男,甘肃平凉人,凯里学院教授,研究方向为植物营养与土壤改良修复。

** [通信作者] 贺晓岚,女,内蒙古乌兰察布人,凯里学院副教授,研究方向为植物分子育种, E-mail: helingzhi123@126.com.

[基金项目] 凯里学院博士发展专项项目(BSFZ202209);贵州省教育厅科技拔尖人才支持计划项目([2017]094)。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料如表 1 所列, 均由河北省农林科学院粮油作物研究所提供. 试验试剂: 氯化镉 ($\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$) 为分析纯试剂.

表 1 镉胁迫参试油菜品种信息

油菜名称	编号	选育单位	特点
丰油 9 号	FY9	河南省农科院棉花油料作物研究所	半冬性细胞质雄性不育三系杂交种, 抗寒性强, 抗 (耐) 菌核病和病毒病弱, 抗倒伏能力较强
广源 58	GY58	华中农业大学	半冬性温敏型细胞质不育两系杂交种, 低抗菌核病、中抗病毒病、抗倒性较强
美国油王 88	MY88	福建省永安市燕丰种业有限公司	中晚熟、抗病、抗倒、耐渍、高产、广适应性、株型紧凑、长势健旺、分枝力强
南油 868	NY868	南充市农业科学院和成都市农林科学院	抗病毒病、抗菌核病、抗倒伏
新都油 800	XDY800	四川福乐种业有限公司选育	高产、优质、多抗、分枝力强, 综合性状优良
早熟 100 天	ZS100	山东省济南市日出种业有限公司	早熟、高油、黄子

1.2 试验设计

采用两因素随机区组试验设计, 一个因素为油菜品种, 6 个水平, 另一个因素为土壤 Cd 含量 (参照已开展过的近缘物种的相似研究^[17-19]), 两个水平: 正常 (0 mg/kg) 和镉胁迫 (5 mg/kg), 共 12 个处理, 每个处理重复 4 次. 土壤经风干, 压碎, 过孔径 2 mm 的筛子, 外源镉以溶液的形式加入, 与土壤混匀后再装入塑料桶 (直径 20 cm, 高 35 cm) 中, 每桶 15 kg. 挑选饱满、无病虫害、大小一致的油菜种子于 2020 年 7 月播种于塑料桶中, 间隔一致, 每桶 30 粒, 在遮雨透光的塑料大棚内培养. 出苗后 7 d, 每桶选留 5 株生长一致的幼苗进行常规管理, 补水间隔为 2 ~ 3 d, 保持土壤水分在土壤持水量的 60% ~ 70%. 播种后 14 d, 幼苗长到五叶一心期, 取样测定.

1.3 测定方法

播种后 14 d, 每桶选取 5 株, 在主茎上选择由下往上数第 3 片叶进行生理指标测定. 用丙酮乙醇混合法测定叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量^[20,21]; 用北京索莱宝科技有限公司的植物类胡萝卜素含量检测试剂盒测定类胡萝卜素含量; 用 Li-6400 便携式光合仪 (美国) 测定光合指标. 于 2020 年 9 月 12 日上午 9: 00—11: 00, 每盆取 5 株油菜, 以幼苗从下往上数第 3 片叶为测定对象, 测净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i), 光源设定为自然光源.

1.4 数据处理与分析

用 Excel 2017 和 SPSS 16.0 对测定数据进行统计分析.

2 结果与分析

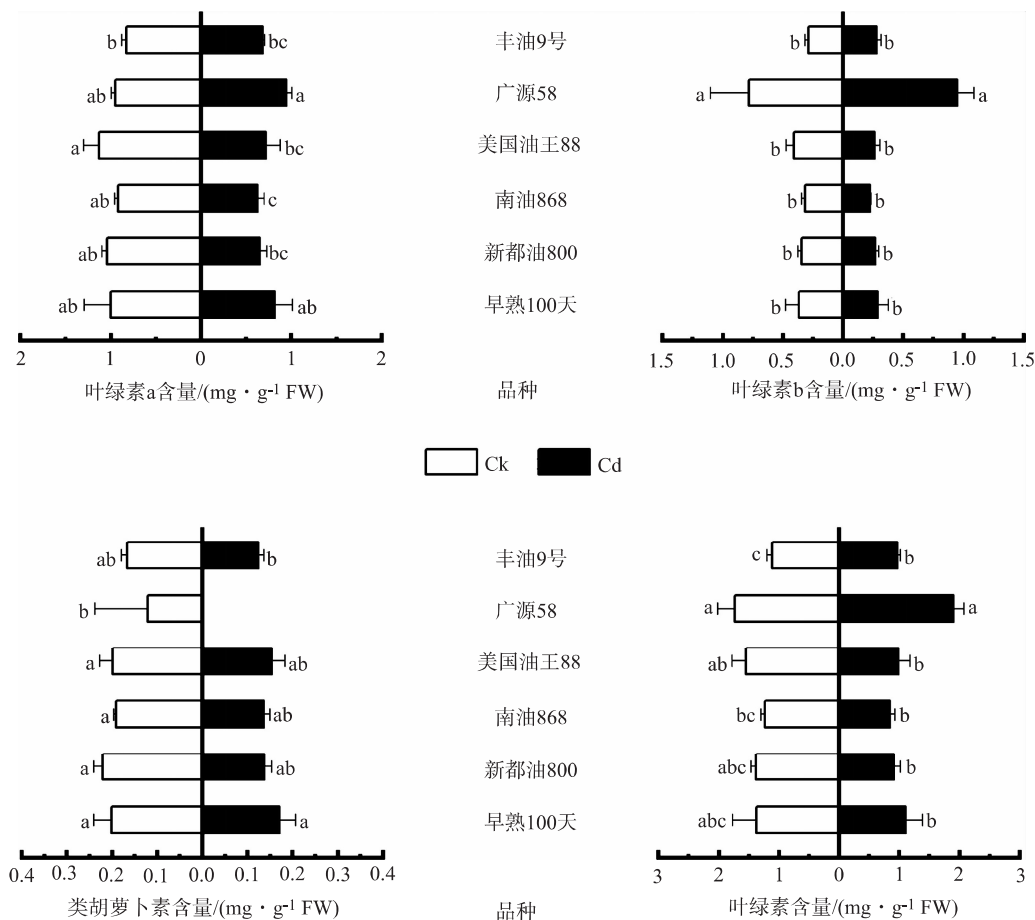
2.1 Cd 胁迫对油菜苗期叶片色素含量的影响

试验中各品种油菜苗期色素含量见图 1. 在正常条件下, 美油 88 幼苗叶绿素 a 含量最高 (1.13 mg/g), 显著高于丰油 9 号; 而在胁迫条件下, 广源 58 幼苗叶绿素 a 含量最高 (0.95 mg/g), 显著高于除早熟 100 外的其他品种. 与正常条件相比, 镉胁迫降低了油菜幼苗叶绿素 a 含量, 新都油 800 的降低幅度最大 (37%), 其次为美油 88 (36%), 而广源 58 降低幅度最小, 仅降低 0.2%.

在正常及 Cd 胁迫条件下, 广源 58 幼苗叶绿素 b 含量最高 (分别为 0.78 mg/g 和 0.95 mg/g), 显著高于其余 5 个品种, 叶绿素 b 含量最低的为南油 868 (0.32 mg/g 和 0.22 mg/g). 与正常条件相比, 镉胁迫条件下, 仅广源 58 幼苗叶绿素 b 含量增高, 增幅 22%, 而其余 5 个品种则出现降低现象, 美油 88 降低幅度最大 (35%), 其次为南油 868 (28%), 丰油 9 号降低幅度最小 (2%).

在正常条件下, 新都油 800 幼苗类胡萝卜素含量最高 (0.22 mg/g), 广源 58 的最低 (0.03 mg/g), 两者之间差异显著. 在胁迫条件下, 早熟 100 幼苗类胡萝卜素含量最高 (0.17 mg/g), 显著高于丰油 9 号. 因广源 58 的镉胁迫样品在测定类胡萝卜素含量时不慎损失, 造成数据缺失. 尽管广源 58 类胡萝卜素数据缺失, 但其叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量在镉胁迫下表现稳定甚至有所提升, 表明该品种对镉胁迫具有较强的耐受性, 因此该数据缺失不影响对广源 58 耐镉性的整体评价. 与正常条件相比, 外源镉显著降低了油菜幼苗类胡萝卜素含量, 新都油 800 降低幅度最大 (38%), 其次为南油 868, 降低了 29%, 早熟 100 的降低幅度最小 (15%).

不同油菜品种幼苗总叶绿素含量存在差异. 在正常条件下, 广源 58 总叶绿素含量最高 (1.73 mg/g), 显著高于南油 868、丰油 9 号, 其次为美油 88 (1.54 mg/g), 显著高于丰油 9 号. 在胁迫条件下, 广源 58 幼苗总叶绿素含量最高 (1.90 mg/g), 显著高于其余 5 个品种的, 南油 868 的幼苗总叶绿素含量最低, 为 0.85 mg/g. 镉胁迫提高了广源 58 幼苗总叶绿素含量, 提高 10%; 而降低了其余 5 个品种的幼苗总叶绿素含量, 美油 88 降低幅度最大 (36%), 其次为新都油 800, 降低了 34%, 丰油 9 号的仅降低了 13%, 降幅最小.



注: 广源 58 的类胡萝卜素含量数据缺失; 同种指标数据的不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$, 下同.

图 1 6 个油菜品种镉胁迫下叶片色素含量比较

2.2 Cd 胁迫对苗期油菜光合特性的影响

6 个油菜品种苗期光合特性对比见图 2. 由图可见, 不同油菜品种幼苗叶片气孔导度存在差异. 在正常条件下, 叶片气孔导度由大到小的顺序为南油 868 > 丰油 9 号 > 早熟 100 > 广源 58 > 新都油 800 > 美油 88, 除新都油 800 与美油 88 气孔导度差异不显著外, 其余品种间气孔导度两两差异显著. 在胁迫条件下, 幼苗叶片气孔导度为南油 868 > 广源 58 > 早熟 100 > 美油 88, 品种间两两差异显著, 新都油 800 和丰油 9

号叶片气孔导度显著低于南油 868 和广源 58. 与正常条件相比, 镉胁迫增加了南油 868 和广源 58 的气孔导度, 增幅分别为 16%、64%; 降低了其余 4 个品种的气孔导度, 美油 88 降低幅度最大 (44%), 其次为丰油 9 号 (35%), 新都油 800 降低幅度最小, 仅降低了 5%.

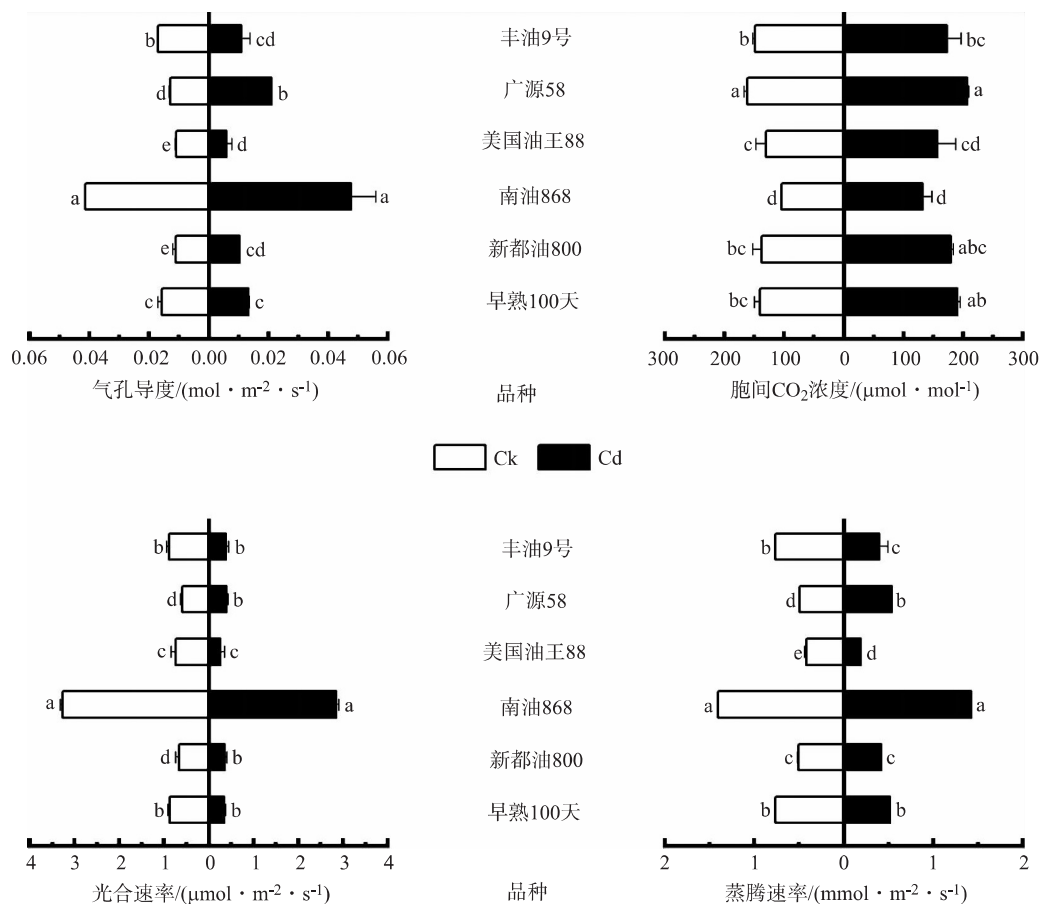


图 2 6 个油菜品种镉胁迫下光合特性比较

不同油菜品种叶片胞间 CO₂ 浓度存在差异, 在正常条件下, 广源 58 叶片胞间 CO₂ 浓度最高 (161 μmol/mol), 显著高于其他品种的, 其次为丰油 9 号, 显著高于美油 88 和南油 868 的. 在胁迫条件下, 广源 58 叶片胞间 CO₂ 浓度最高 (207 μmol/mol), 显著高于丰油 9 号、美油 88、南油 868. 与正常条件相比, 镉胁迫增加了油菜幼苗叶片胞间 CO₂ 浓度, 早熟 100 增幅最大 (37%), 其次为新都油 800 (30%), 丰油 9 号增加幅度最小 (17%).

在正常条件下, 南油 868 光合速率最高 (3.26 μmol/(m² · s)), 显著高于其他品种; 丰油 9 号、早熟 100 的叶片光合速率显著高于美油 88、新都油 800、广源 58; 美油 88 的叶片光合速率显著高于新都油 800、广源 58. 在胁迫条件下, 南油 868 幼苗叶片光合速率最高 (2.86 μmol/(m² · s)), 显著高于其他品种; 美油 88 幼苗叶片光合速率最低 (0.27 μmol/(m² · s)), 显著低于其他品种. 与正常条件相比, 镉胁迫降低了幼苗叶片的光合速率, 美油 88 降幅最大 (64%), 南油 868 降幅最小 (13%).

在正常条件下, 南油 868 蒸腾速率最高 (1.40 mmol/(m² · s)), 显著高于其他品种; 丰油 9 号、早熟 100 的叶片蒸腾速率显著高于新都油 800、广源 58、美油 88, 而新都油 800 > 广源 58 > 美油 88, 两两差异显著. 在胁迫条件下, 南油 868 幼苗叶片蒸腾速率最高 (1.43 mmol/(m² · s)), 显著高于其他品种; 美油 88 幼苗叶片蒸腾速率最低 (0.19 μmol/(m² · s)), 显著低于其他品种. 与正常条件相比, 镉胁迫提高了广源 58、南油 868 幼苗叶片的蒸腾速率, 分别提高了 9% 和 2%, 降低了其余 4 个品种叶片蒸腾速率, 美油 88 降幅最高 (54%), 而新都油 800 降幅最小 (16%).

3 讨 论

镉是植物非必需但毒性最强的重金属元素之一, 在植物体内的积累会对其产生毒害作用. 植物对 Cd 胁迫的响应是一个复杂的生理生化代谢过程. 不同油菜品种表现出不同的抗镉机制, 同时也受多种因素影响, 使得各指标在镉胁迫条件下的表现也不尽相同^[20]. 在环境因子中, 光照条件的变化常与重金属胁迫共同影响植物的光合生理过程. 光是植物进行光合作用、生长发育所必需的能量来源, 但在胁迫条件下, 光能吸收与利用的失衡可能加剧光抑制现象. 而镉对植物光合特性的影响是多方面的, 主要包括叶绿素含量、气孔导度、蒸腾速率、细胞间 CO₂ 浓度等. 叶绿素位于类囊体膜, 是一类与光合作用有关的重要色素. 过量的镉不仅影响植物光合器官的叶绿素含量和碳代谢酶活性, 而且破坏其光合结构, 从而造成光合速率下降, 抑制正常生长发育^[21]. 其中叶绿素 a 的作用是光能捕获和电荷分离, 叶绿素 b 的作用是光能吸收和传递, 被广泛用于评价重金属胁迫对植株的损伤程度^[22].

本研究结果表明, 与正常条件相比, 镉胁迫降低了不同油菜品种幼苗叶绿素 a 含量. 张茂等^[23]研究表明, 镉胁迫对黑麦草叶绿素 a 含量影响并不显著, 其研究结果显示, 低浓度降低黑麦草叶绿素 a 含量, 而高浓度则呈提高趋势; 镉胁迫显著降低了黑麦草的生物量, 而且抑制效应随镉浓度的增加而增加. 因此, 叶绿素 a 含量的上升可能是由于生物量相对降低率高于叶绿素总累积量的相对降低率, 进而引发了浓缩效应造成的. 镉胁迫下, 多数油菜品种的叶绿素 b 及叶绿素总含量下降. 这些研究结果与已报道的基本一致. 有研究结果^[24]表明, 随着镉及铅等重金属污染物胁迫浓度的增加, 丁香蓼叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素 a + b 的含量均呈下降趋势. 也有研究^[25]证明, 在镉胁迫下, 不同抗性水稻品种的叶绿素含量均呈下降趋势, 其幼苗的光合性能存在明显差异. 植物类胡萝卜素是光吸收复合体的重要组分, 在保护光合器官、防止光氧化损伤等方面起着重要作用. 本研究结果显示, 与正常条件相比, 外源镉显著降低了供试油菜幼苗类胡萝卜素含量. 上述研究与已报道的关于油菜在 Cd 胁迫下色素含量变化的研究结果相一致^[26], 表明受镉胁迫后油菜的光合器官受到了不同程度的氧化损伤. 总体上, 在镉胁迫下油菜叶片色素含量降低.

镉胁迫导致光合色素含量降低, 其可能原因有两个方面, 一方面镉胁迫阻碍了油菜叶片色素合成, 在刺槐、青葙上的研究就证实了这一点, 镉可抑制叶绿素 a 和叶绿素 b 的合成酶活性, 使叶绿素总量减少^[27-29]. 李陈贞等^[25]研究表明, 高浓度镉胁迫 (如 0.2 mmol/L) 显著降低水稻幼苗叶片的叶绿素含量, 而低浓度 (0.05 mmol/L) 对叶绿素合成影响较小; 另一方面, 由于镉胁迫加速了植物叶片中色素的降解, 镉胁迫可诱导活性氧生成, 导致叶绿素结构氧化损伤. 凌宇等^[30]研究表明: 300 mmol/L 的镉胁迫可显著增加高羊茅叶片的丙二醛含量而引发脂质过氧化. 在镉胁迫下, 白三叶、高羊茅和黑麦草的光合色素含量呈下降趋势, 超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性和丙二醛含量总体呈上升趋势, 过氧化氢酶活性呈先升后降趋势, 高浓度的镉胁迫对 3 种草坪草叶片超微结构造成损伤^[31].

同时本研究发现镉胁迫对不同品种油菜色素含量影响趋势不完全一致. 在镉胁迫下, 广源 58 表现与其他品种不同, 其叶绿素 a 含量仅降低 0.2%, 叶绿素 b 含量及总叶绿素含量均有所增加. 由此可见广源 58 对镉胁迫的抗性高于其他品种, 广源 58 的光合性能响应也证实了这一点, 镉胁迫下广源 58 的气孔导度和蒸腾速率分别增加了 64%、9%, 叶片胞间 CO₂ 浓度最高. 李陈贞等^[25]在水稻上的研究表明高抗性品种 (如丰华占) 在低浓度镉胁迫 (0.05 mmol/L) 下叶绿素含量下降显著, 而中等抗性品种 (如 28 占) 仅在较高浓度 (0.2 mmol/L) 胁迫下叶绿素含量降低. 凌宇等^[30]研究表明 300 mmol/L 的镉胁迫可使叶绿素含量降低, 但高羊茅的叶绿素 a 降幅大于叶绿素 b, 而匍匐剪股颖的叶绿素 a 降幅较小. 总之不同植物在应对镉胁迫时, 其叶绿素响应呈现出较大的差异性, 这一发现为筛选适用于镉污染修复的植物种类提供了坚实的理论支撑和有效的筛选途径.

镉胁迫对植物光合色素的合成及降解的影响, 最终会反应在光合性能的变化上. 气孔导度表示的是气孔张开的程度, 影响植物的蒸腾、光合和呼吸等生理过程. 本研究结果表明, 与正常条件相比, 镉胁迫增加了油菜幼苗叶片胞间 CO₂ 浓度, 也增加了南油 868 和广源 58 的气孔导度, 降低了其余 4 个品种的气孔导度, 其中美油 88 降低幅度最大. 在胁迫条件下, 南油 868 幼苗叶片蒸腾速率最高, 美油 88 幼苗叶

片蒸腾速率最低。在镉胁迫下,所有油菜的光合速率均有所下降,但镉低积累品种美油 88^[32] 光合速率降低幅度最大,而镉高积累品种南油 868 光合速率降低幅度最小且胁迫前后均维持较高水平。上述结果表明南油 868 对镉胁迫的抗性和耐性都比较高。

一般认为,气孔限制和非气孔限制是引起光合速率降低的主要原因,而细胞间 CO₂ 浓度是判断气孔限制和非气孔限制的依据^[33]。本研究结果表明在胁迫条件下,6 个供试油菜品种的光合速率均有所下降,而胞间 CO₂ 浓度均有所增加,因此推测其光合作用可能受非气孔限制的影响。南油 868 对镉胁迫耐性和积累性较强,虽然其植株体内镉积累量最高,但是其光合速率未降低,表明高镉积累量未能破坏其碳代谢途径;美油 88 对镉的积累性较低,对镉胁迫具有一定耐性,可以为低镉油菜的育种提供亲本材料;本研究可为甘蓝型油菜品种耐镉材料筛选和耐镉育种提供理论参考。

4 结 论

本研究表明,在一定浓度镉胁迫下,6 个油菜品种的镉耐受能力存在差异。综合表现为南油 868 耐镉性较强。以上研究说明油菜 Cd 积累与其品种有关。本研究可为甘蓝型油菜品种耐镉材料筛选和低镉油菜育种提供理论参考。

[参考文献]

- [1] 江海东,周琴,李娜,等. Cd 对油菜幼苗生长发育及生理特性的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2006, 28 (1): 39-43.
- [2] 冯亚娟,李廷轩,蒲勇,等. 不同镉积累类型小麦各器官镉积累分布规律及机理分析 [J]. 作物学报, 2022, 48 (7): 1761-1770.
- [3] 许艳萍,杨明,郭鸿彦,等. 5 个工业大麻品种对 5 种重金属污染土壤的修复潜力 [J]. 作物学报, 2020, 46 (12): 1970-1978.
- [4] 熊敏先,吴迪,许向宁,等. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2021, 16 (6): 133-149.
- [5] 高芳,林英杰,张佳蕾,等. 镉胁迫对花生生理特性、产量和品质的影响 [J]. 作物学报, 2011, 37 (12): 2269-2276.
- [6] 刘新红,邓力超,李莓. 强酸性土壤大田条件下油菜镉吸收累积特性初探 [J]. 湖南农业科学, 2018 (10): 56-59.
- [7] 武琳霞,丁小霞,李培武,等. 我国油菜镉污染及菜籽油质量安全性评估 [J]. 农产品质量与安全, 2016 (1): 41-46.
- [8] 王凯荣,龚惠群,王久荣. 栽培植物的耐镉性与镉污染土壤的农业利用 [J]. 农业环境保护, 2000, 19 (4): 196-199.
- [9] 黎红亮,杨洋,陈志鹏,等. 花生和油菜对重金属的积累及其成品油的安全性 [J]. 环境工程学报, 2015, 9 (5): 2488-2494.
- [10] 梁效贵,黄国勤. 利用油菜修复农田镉污染土壤的研究进展 [J]. 生态科学, 2021, 40 (4): 237-248.
- [11] 陆开彤,汤飞峰,丁沃娜. 镉胁迫对不同基因型小白菜种子萌发的影响 [J]. 宁波大学学报(理工版), 2012, 25 (2): 1-6.
- [12] 孟桂元,唐婷,周静,等. 不同玉米品种种子萌发期耐镉性分析 [J]. 分子植物育种, 2016, 14 (11): 3166-3171.
- [13] 孙亚莉,刘红梅,徐庆国. 镉胁迫对不同水稻品种种子萌发特性的影响 [J]. 中国水稻科学, 2017, 31 (4): 425-431.
- [14] 张盼盼,王小林,郭亚宁,等. 40 个不同糜子品种种子萌发期耐镉性评价 [J]. 西北农业学报, 2020, 29 (12): 1803-1813.
- [15] 龙春丽,宋拉拉,胡明文,等. 镉胁迫对不同品种辣椒种子萌发及苗期抗性生理的影响 [J]. 种子, 2021, 40 (5): 105-109.
- [16] 李美芳,张平,李倩,等. 镉胁迫下两株产铁载体/解磷菌株对黑麦草种子萌发及幼苗积累镉的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41 (9): 179-187.
- [17] 谢甜,冯刚,闫庆龙,等. 镉胁迫对转 Ppr1 基因油菜生理生化的影响 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2017, 54 (2): 387-392.
- [18] 安婷婷,黄帝,王浩,等. 植物响应镉胁迫的生理生化机制研究进展 [J]. 植物学报, 2021, 56 (3): 347-362.
- [19] 郑本川,张锦芳,柴靓,等. 甘蓝型油菜种子萌发期耐镉性分析及耐镉材料筛选 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (35): 26-35.
- [20] 徐芬芬,叶利民,徐卫红,等. 小白菜叶绿素含量的测定方法比较 [J]. 北方园艺, 2010 (23): 32-34.
- [21] 努尔凯麦尔·木拉提,杨亚杰,帕尔哈提·阿布都克日木,等. 小麦叶绿素含量测定方法比较 [J]. 江苏农业科学,

- 2021, 49 (9): 156-159.
- [22] 王涛, 黄语燕, 陈永快, 等. 镉胁迫对生菜生长、生理特性及镉富集转运特征的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (7): 115-124.
- [23] 张茂, 徐彦红, 席溢, 等. 铅、锌、镉胁迫对多年生黑麦草生长及生理生化特性的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2021, 23 (3): 41-50.
- [24] 简敏菲, 史雅甜, 陈涛, 等. 重金属镉、铅胁迫下湿地植物丁香蓼的生理生化特征研究 [J]. 江西师范大学学报 (自然科学版), 2017, 41 (1): 93-98.
- [25] 李陈贞, 孙亚莉, 刘红梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种幼苗生长及光合性能的差异 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2021, 47 (2): 147-152.
- [26] 朱秀红, 韩晓雪, 温道远, 等. 镉胁迫对油菜亚细胞镉分布和镉化学形态的影响 [J]. 北方园艺, 2020 (10): 1-9.
- [27] 唐佳乐, 于志民, 李润唐, 等. 重金属镉对植物原初光能转化的影响 [J]. 中南农业科技, 2023, 44 (1): 229-235.
- [28] 刘金秀, 张松彦, 周建, 等. 镉胁迫对刺槐幼苗生长与光合生理特性的影响 [J]. 林业科学研究, 2023, 36 (3): 168-178.
- [29] 胡佳瑶, 王悟敏, 匡雪韶, 等. 镉胁迫下青葙种子萌发及幼苗生理特性 [J]. 草业科学, 2022, 39 (7): 1391-1398.
- [30] 凌宇, 龙江宇, 项远航, 等. 镉胁迫对高羊茅和匍匐剪股颖抗逆生理特性的影响 [J]. 植物科学学报, 2022, 40 (5): 705-713.
- [31] 张秀娟, 范玟, 杨乐, 等. 镉胁迫对 3 种草坪草生理特性及叶片超微结构的影响 [J]. 草地学报, 2023, 31 (9): 2663-2670.
- [32] 贺晓岚, 王建伟, 李文旭, 等. 镉胁迫对甘蓝型油菜苗期生长及镉积累的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2023 (2): 59-65.
- [33] 周蛟, 韩盼盼, 潘远智, 等. Cd 胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (1): 26-34.

Study on the Resistance of Cadmium-stress from 6 *Brassica napus* Varieties

WANG Jianwei¹, HE Xiaolan²

(1. School of Science, Kaili University, Kaili, Guizhou, China 556011;

2. School of Life and Health Science, Kaili University, Kaili, Guizhou, China 556011)

Abstract: To clarify the differences in cadmium (Cd) accumulation ability and physiological mechanisms among six tested *Brassica napus* L varieties, and their physiological mechanisms, six rape varieties were used as materials to study the effects of $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd stress on chlorophyll content and photosynthetic characteristics. The results showed that except Guangyuan 58, the chlorophyll content and carotenoid content of the other five varieties showed a downward trend of the photosynthetic rate, and the intercellular CO_2 concentration increased. Meiyou 88 had the largest decline in photosynthetic rate, and Nanyou 868 had the smallest decline. In summary, Meiyou 88 is more sensitive to Cd stress, Nanyou 868, more resistant to Cd stress, belongs to the Cd-tolerant type.

Key words: cadmium stress; photosynthetic characteristics; *Brassica napus* L.; leaf pigments

(责任编辑: 陈伟超)