

镉胁迫对不同基因型小白菜氮代谢和光合作用的影响

钱雷晓¹ 胡承孝¹ 赵小虎^{1,2} 汪媛¹
辛绢¹ 郑亚伟¹ 谭启玲¹ 孙学成¹

1. 华中农业大学新型肥料湖北省工程实验室, 武汉 430070;
2. 农业部农产品质量安全检测与评价重点实验室, 广州 510640

摘要 以硝酸盐低积累和高积累2个品种小白菜(*Brassica campestris* L. ssp.)为试验材料,采用盆栽的方式研究不同浓度镉(Cd)处理对小白菜叶片中硝酸盐、铵态氮、游离氨基酸、可溶性蛋白、氮代谢相关酶活性及光合作用的影响。结果表明,在试验设置的镉含量(0~7.0 mg/kg)范围内,随着镉含量的升高,硝酸盐低积累品种小白菜的生长受到显著抑制;低积累品种叶片的硝酸盐和可溶性蛋白含量均呈先增加后降低的趋势,高积累品种则逐渐降低。镉胁迫促进铵态氮和游离氨基酸在小白菜叶片中的累积,其中,低积累品种表现得更为明显。镉胁迫下,2个品种小白菜的硝酸还原酶活性均受到显著抑制。随着镉含量的升高,与对照相比,2个品种小白菜的净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率均呈先增加后降低的趋势。镉胁迫使得小白菜对氮素的吸收代谢紊乱,光合速率降低,且胁迫的响应程度与小白菜的基因型有关,在硝酸盐低积累品种中表现得更为显著。

关键词 镉; 氮; 小白菜; 代谢; 光合作用

中图分类号 X 173; S 634.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)03-0069-07

由于工业“三废”的排放、农药和磷肥的施用及污水灌溉等,导致土壤受到不同程度的镉污染^[1-2]。镉易溶于水,进入土壤后容易被植物吸收,影响植物的正常生长^[3-5]。镉对植物生长的抑制作用主要表现在对生长速率、新陈代谢和酶活性的影响^[3]。镉抑制大豆^[6]、水稻^[7]及龙葵^[8]的氮代谢过程;抑制芥菜^[9-10]、遏蓝菜^[11]、杨树^[12]的光合作用,降低其光合速率。

在城郊菜地生态系统中,由于蔬菜需肥量大,菜农大量施用氮肥使得土壤中氮素富集越来越严重。氮肥施用量的增加将显著提高油菜、小白菜和菠菜各个部位的硝酸盐含量^[13]。研究表明,土壤镉污染能够导致土壤中硝态氮和铵态氮含量增加^[14],这将进一步加剧土壤氮素富集状况。当前城郊菜地面临镉污染、氮富集的双重威胁,探明镉污染对蔬菜氮素吸收代谢的影响显得尤为重要。有关镉胁迫对植物氮素吸收代谢影响的研究大都采用营养液培养方

法,缺乏实际指导意义。因此,笔者以硝酸盐高低积累2个品种小白菜为供试材料,通过盆栽试验研究不同镉污染水平下2个品种小白菜叶片中的硝态氮、铵态氮、氮代谢中间产物、关键酶活性以及光合参数的差异,旨在探明镉对小白菜氮代谢和光合作用的影响,为镉污染菜地蔬菜安全生产提供理论依据,也为缓解土壤“氮富集、镉污染”现状提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验处理

试验于2013年4月至5月在华中农业大学微量元素研究中心盆栽场进行。供试小白菜品种为笔者所在课题组前期筛选获得的硝酸盐低积累品种(L45,白叶四月慢(不结球白菜):叶色淡绿,叶面平滑,叶柄浅白色,扁平,束腰型,耐热抗寒)和硝酸盐高积累品种(H64,矮脚黄(不结球白菜):叶卵圆形,

收稿日期: 2014-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271275); 农业部农产品质量安全检测与评价重点实验室开放课题(NK201302); 环境污染过程与基准教育部重点实验室(南开大学)开放课题(KL-PPEC-2013-08)

钱雷晓, 硕士研究生。研究方向: 植物营养学与农产品安全。E-mail: qianleixiao@163.com

通信作者: 赵小虎, 博士, 讲师。研究方向: 微量元素与生态安全。E-mail: xzhzhao@mail.hzau.edu.cn

叶片淡绿色,叶面平滑、全缘,叶柄白色扁平,较矮,束腰,耐热性中等,耐寒性强),筛选均在正常施用氮肥条件下进行。供试土壤为湖北省武汉市新洲区酸性黄棕壤,其理化性质为:pH 5.20,有机质 16.71 g/kg,碱解氮 89.55 mg/kg,速效钾 153.05 mg/kg,速效磷 20.92 mg/kg,未检测出镉。采用聚乙烯塑料盆为定植容器,每盆装土 6.0 kg,定植 8 棵。设 5 个镉水平,6 个处理,如表 1 所示。每个处理重复 4 次。播种前每千克土壤施入 P_2O_5 0.15 g、 K_2O 0.2 g、阿农营养液 1 mL。试验中,N、P、K 肥分别以尿素、磷酸二氢钾和硫酸钾为肥源。所有肥料均为分析纯试剂,配成溶液在播种前施入,拌匀。镉以 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ 的形式施入,施入方法参考张晶等^[15]模拟镉污染土壤,将 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$ 配成溶液,加入土壤后反复混匀,保持土壤水分,熟化平衡 1 个月后种植小白菜。整个生育期间用去离子水浇灌,以玻璃钢瓦活动棚防雨水淋洗。

表 1 试验设置的处理

Table 1 Treatments of the pot experiment

| 项目 Item | CK | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 氮/(g/kg) N | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 镉/(mg/kg) Cd | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 5.0 | 7.0 |

1.2 测定方法

试验结束时,取 3 株样品为测酶样品。剪下用去离子水洗后立即冻入液氮中,尽快送至超低温冰箱保存,并尽快测定酶活性。剩余样品测定产量之后,取部分鲜样保存于冰箱中,及时测定硝酸盐等指标,剩余鲜样洗净后烘干用于养分测定。其中,硝酸盐含量采用 5% 硫酸-水杨酸提取比色法^[16],铵态氮含量采用纳氏试剂比色法^[17],游离氨基酸采用茚三酮溶液显色法^[16],可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法^[16],硝酸还原酶采用离体法^[16],谷氨酰胺合酶采用 0.05 mol/L Tris-HCl 提取比色法测定^[17],光合参数采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400XT 便携式光合测定系统,测定各处理倒三叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r),测定时间为 09:00—11:00。

1.3 数据分析

数据采用 DPS 进行方差分析,Sigmaplot 10.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 镉对小白菜产量的影响

在正常补充氮肥的情况下,随着镉含量的增加,

小白菜的产量呈逐渐降低的趋势,且在镉添加量高于 1.0 mg/kg 的处理中减产达显著水平,与 T1 相比,在 T3、T4 和 T5 处理中,减产幅度分别为 15.38%、19.54%和 26.79%(表 2)。H64 的产量则随着镉含量的增加呈先增后降的趋势,且在镉含量为 1.0 mg/kg 时增幅最大,较 T1 增加 18.26%,差异达显著水平。在 T1 和 T2 处理下,L45 的产量比 H64 分别高出 28.98%和 21.48%,差异达到显著水平。

表 2 镉胁迫对小白菜鲜质量的影响¹⁾

Table 2 Effects of Cd on the fresh weight of Chinese cabbage

| 镉处理 Cd treatment | L45 | H64 |
|------------------|---------------|---------------|
| CK | 16.97±0.94 e | 14.43±0.64 c |
| T1 | 26.77±1.25 a | 20.76±1.53 b |
| T2 | 25.46±1.38 ab | 20.95±0.94 b |
| T3 | 22.66±0.62 bc | 24.55±0.31 a |
| T4 | 21.54±0.60 cd | 21.75±0.55 ab |
| T5 | 19.60±0.42 de | 20.99±1.06 b |

1)不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平($P < 0.05$),2 个品种分别进行方差分析,下同。Values followed by different letters mean significant at 5% level among treatments. Two species were analyzed by ANOVA respectively. The same as below.

2.2 镉对小白菜叶片硝态氮和铵态氮含量的影响

由图 1 看出,随着镉含量的升高,L45 叶片的硝态氮含量呈先增后降的趋势,与 T1 处理相比,T2 处理增加 50.45%,增幅最大,差异达到显著水平。H64 则随着镉含量的增加,硝态氮含量逐渐降低,与 T1 相比,在镉添加量为 5.0 和 7.0 mg/kg 处理中显著降低,降幅分别为 14.67%和 17.35%。当镉含量为 7.0 mg/kg 时,L45 和 H64 叶片的硝态氮含量分别较 T1 处理降低 1.74%和 17.35%。T1、T3 和 T4 处理中,H64 叶片硝态氮含量分别比 L45 高出 31.68%、18.23%和 13.62%,T2 处理中 H64 叶片硝态氮含量比 L45 低 20.32%,差异均达到显著水平。2 个品种小白菜的硝态氮含量均在不施氮肥的处理下最低。

随着镉含量的增加,2 个品种小白菜叶片中铵态氮含量呈逐渐增加的趋势(图 1)。与 T1 处理相比,当镉添加量为 7.0 mg/kg 时,L45 和 H64 的增幅分别为 13.66%和 33.30%。在不同镉含量胁迫下,L45 叶片铵态氮含量分别比 H64 高 67.52%、44.73%、42.47%、38.95%和 42.83%,均达到显著性差异。

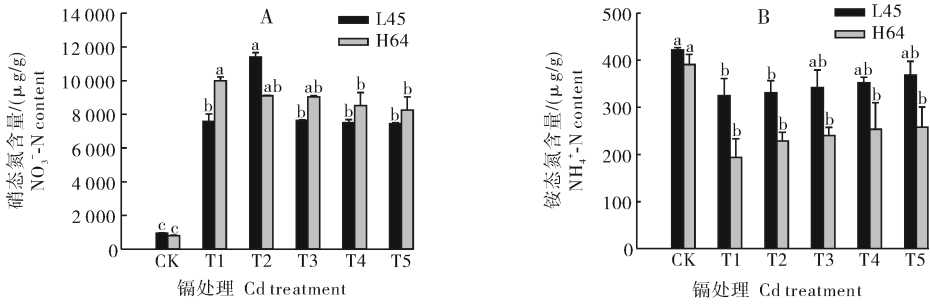


图 1 镉胁迫对小白菜叶片中硝态氮(A)和铵态氮(B)含量的影响

Fig. 1 Effects of Cd on contents of NO₃⁻-N (A) and NH₄⁺-N(B) in leaves of two Chinese cabbage cultivars

2.3 镉对小白菜叶片游离氨基酸和可溶性蛋白含量的影响

随着镉含量增加,2 个品种小白菜的游离氨基酸的含量均呈先增后降的趋势(图 2A),L45 在 1.0、5.0 和 7.0 mg/kg 镉胁迫处理增加显著,较 T1 处理增幅分别达到 67.13%、59.47%和 35.66%,H64 在 5.0 mg/kg 镉胁迫处理显著增加,增幅达 17.93%。与 T1 处理相比,在镉添加 7.0 mg/kg 时,L45 和 H64 叶片的游离氨基酸含量均增加,增幅分别为 35.66%和 4.47%。在 CK、T1、T2、T4 和 T5 处理,H64 的游离氨基酸含量分别比 L45 高 16.65%、47.80%、43.47%、9.30%和 13.82%,在 T3 处理低 9.49%,均达到显著性差异。

随着镉含量的增加,L45 的可溶性蛋白含量呈先增后降的趋势(图 2B),在 0.1 和 1.0 mg/kg 镉胁迫

处理分别较 T1 处理增加 62.85%和 61.18%,差异均达到显著水平,H64 可溶性蛋白含量则逐渐降低,与 T1 相比,在 0.1、1.0、5.0 和 7.0 镉胁迫处理中降幅分别为 34.29%、34.68%、36.40%和 37.27%,差异均达到显著水平。在 T1、T2 和 T3 处理中,2 个品种小白菜的可溶性蛋白含量差异显著,在 T1 中,H64 比 L45 高 62.67%,T2 和 T3 处理中,L45 比 H64 高 52.36%和 51.68%。

2.4 镉对小白菜叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合酶活性的影响

在不同镉含量胁迫下,2 个品种小白菜叶片的硝酸还原酶活性均呈降低的趋势(图 3A),与 T1 处理相比,在 0.5 mg/kg 镉胁迫下,L45 和 H64 均显著降低,降幅分别为 45.35%和 53.94%,在 7.0 mg/kg 镉胁迫下,降幅分别为 81.86%和 69.77%。

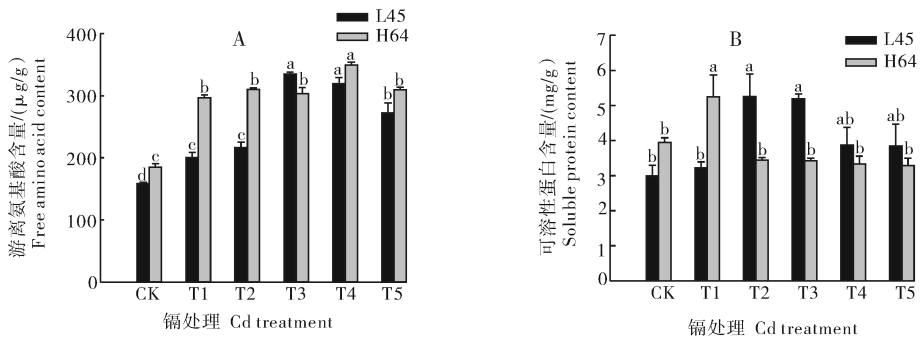


图 2 镉胁迫对小白菜叶片中游离氨基酸(A)和可溶性蛋白(B)含量的影响

Fig. 2 Effects of Cd on contents of free amino acids (A) and soluble protein (B) in leaves of two Chinese cabbage cultivars

随着镉含量的增加,2 个品种小白菜的谷氨酰胺合酶活性均呈先增加后降低的趋势(图 3B),与 T1 处理相比,H64 在 5.0 和 7.0 mg/kg 镉胁迫处理增幅最大,分别为 16.71%和 13.42%,L45 在 0.1 mg/kg 镉胁迫处理增加 4.20%,增幅最大。在 CK 处理中,L45 的谷氨酰胺合酶活性比 H64 高出 52.20%,在 T4 和 T5 处理中,H64 比 L45 分别高

出 43.83%和 59.46%,差异均达到显著水平。

2.5 镉对小白菜光合作用的影响

随着镉含量的升高,2 个品种小白菜的净光合速率都呈先增后降的趋势(图 4A),L45 在 0.1 mg/kg 镉胁迫处理最大,H64 在 1.0 mg/kg 镉胁迫处理达最大。L45 的净光合速率在 7.0 mg/kg 镉胁迫处理最低,与 T1 处理相比,降幅为 11.95%。

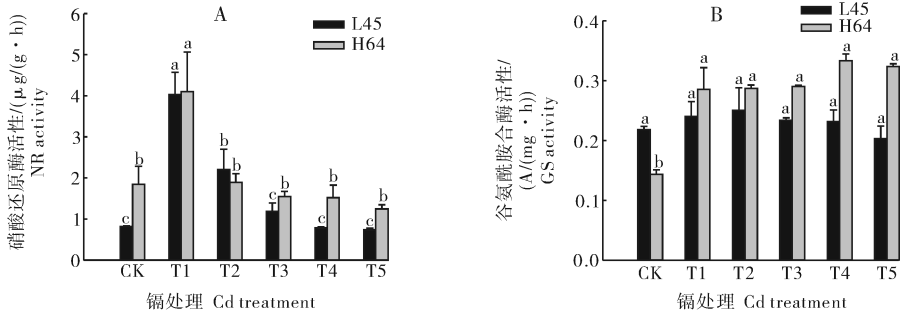


图 3 镉胁迫对小白菜叶片中硝酸还原酶(A)和谷氨酰胺合酶(B)活性的影响

Fig. 3 Effects of Cd on NRA(A) and GSA(B) in leaves of two Chinese cabbage cultivars

在高镉(≥ 1.0 mg/kg)处理下,L45的净光合速率都显著低于H64。

随着镉含量的增加,2个品种小白菜的气孔导度也呈先增后降的趋势,与T1处理相比,L45在T2和T3处理显著增加,T2处理较T1处理增加51.44%,T3处理增加至T1处理的2.21倍,H64在T4处理最大,增幅为31.30%。在T1、T4和T5处理中,H64的气孔导度比L45分别高出72.75%、92.26%和59.25%,均达到显著性差异(图4B)。

随着镉添加量的增加,2个品种小白菜的胞间

CO₂浓度均呈先增后降的趋势(图4C)。与T1相比,L45的胞间CO₂浓度在1.0 mg/kg镉胁迫处理显著增加,增幅为7.82%,H64在0.1 mg/kg镉胁迫处理最大。

随着镉含量增加,2个品种小白菜的蒸腾速率均呈先增后降的趋势(图4D),均在1.0 mg/kg镉胁迫处理最大。与T1处理相比,L45的蒸腾速率在0.1和1.0 mg/kg镉胁迫处理显著增加,增幅分别为23.95%和32.78%。在CK和T1处理中,H64的蒸腾速率比L45分别高出26.46%和23.96%,达到显著性差异。

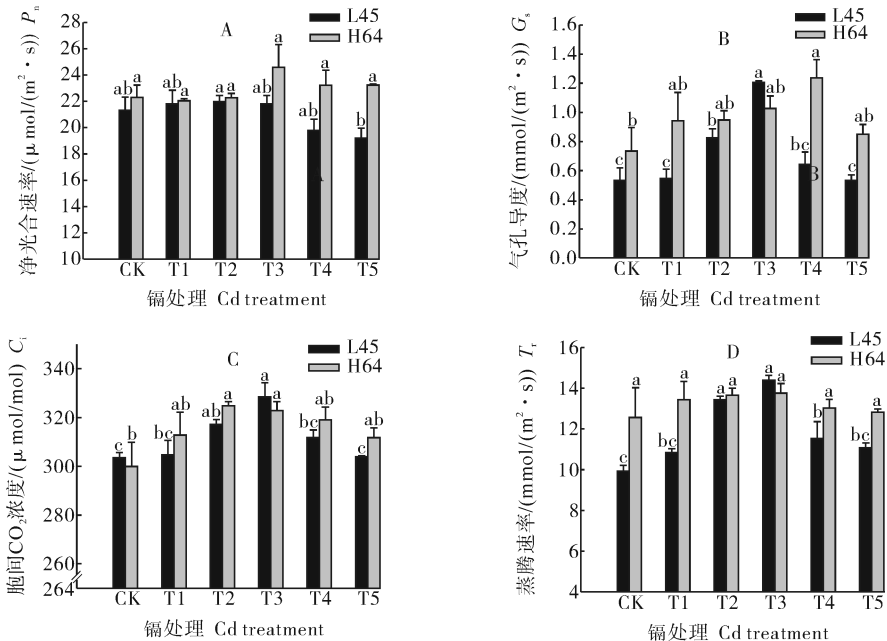


图 4 镉胁迫对小白菜净光合速率(A)、气孔导度(B)、胞间CO₂浓度(C)和蒸腾速率(D)的影响

Fig. 4 Effects of Cd on P_n(A), G_s(B), C_i(C) and T_r(D) of two Chinese cabbage cultivars

2.6 镉对小白菜地上部镉含量的影响

如图5所示,随着土壤中添加镉含量的增加,2

个品种小白菜地上部全镉含量都显著增加。与0.1 mg/kg镉胁迫处理相比,在5.0和7.0 mg/kg镉胁迫

胁迫处理中, L45 地上部镉含量则增加至 0.1 mg/kg 镉胁迫处理的 7.93 和 12.92 倍。H64 地上部镉含量在高镉处理下显著增加, 与 0.1 mg/kg 镉胁迫处理相比, 1.0、5.0 和 7.0 mg/kg 镉胁迫处理中, H64 地上部镉含量分别增加至 0.1 mg/kg 镉胁迫处理的 2.20、9.41 和 12.84 倍。在所有添加镉的处理中, L45 地上部镉含量均高于 H64, 在高镉处理(5.0 和 7.0 mg/kg) 中, L45 地上部镉含量比 H64 高 33.19% 和 58.96%, 差异均达到显著水平。

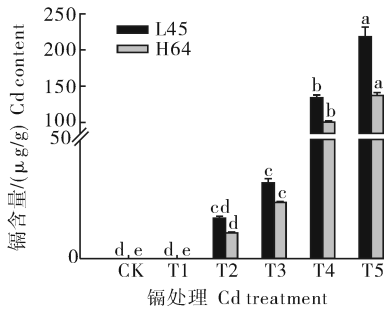


图 5 镉胁迫对小白菜地上部镉含量的影响
Fig. 5 Effects of Cd on Cd content in shoots of two Chinese cabbage cultivars

3 讨论

3.1 镉污染对不同基因型小白菜生长及地上部镉含量的影响

低浓度的镉会抑制耐性差的植物生长, 促进耐性较强的植物生长^[18]。本研究中, 镉胁迫致硝酸盐低积累品种小白菜(L45)的产量显著降低, 表明低浓度的镉扰乱其新陈代谢, 抑制其生长。然而, 低浓度镉处理下, 硝酸盐高积累品种小白菜(H64)的产量反而有所增加, 这与超富集植物特性相似^[8]。造成硝酸盐高低积累品种生长状况差异的原因可能是由于 L45 对镉较敏感, 而 H64 则表现出一定的耐性。在同一镉污染水平下, L45 地上部镉含量均高于 H64, 表明 L45 对镉有较高吸收积累能力, 导致其对镉较敏感。

3.2 镉污染对不同基因型小白菜氮素代谢的影响

在低浓度镉处理下, 硝酸盐低积累品种小白菜 L45 的硝酸盐含量增加, 硝酸还原酶活性则显著降低, 而 H64 硝酸盐含量在低镉条件下变化不大, 这表明低浓度镉对 L45 氮素同化过程抑制作用较大, 导致其硝态氮积累高于 H64。在高镉胁迫条件下, 2 个品种的硝酸盐含量均降低, 这可能是由于高浓度镉在抑制硝酸盐同化的同时, 也抑制氮素的吸

收^[19], 且对吸收抑制更为显著。镉胁迫下, 2 个品种小白菜的硝酸还原酶活性显著降低, 这与在番茄^[20-21]、水芹^[22]、大豆^[23]、黄瓜^[24]、稻秧^[25]和漆树苗^[4]等作物研究结果基本一致。究其原因, 可能是镉与硝酸还原酶中的一 SH 结合, 占据酶的活性中心, 使 NR 失活^[19]。正常施用氮肥处理中, 2 个品种小白菜的硝酸还原酶活性没有差异, 表明硝酸盐积累差异是由于氮素吸收不同所导致的, 而在不施氮肥处理中, L45 的硝酸还原酶活性低于 H64, 即 H64 对吸收的硝态氮有较强的同化能力, 从而导致 2 个品种小白菜硝酸盐含量无差异。

镉胁迫下, 硝酸盐高/低积累品种小白菜叶片中铵态氮含量都增加, 谷氨酰胺合酶活性降低, 表明镉胁迫下 2 个品种小白菜叶片铵态氮同化受阻。Chaffei 等^[21]和 Gouia 等^[23]关于番茄和大豆的研究也得到相似的结果。L45 的铵态氮含量高于 H64, 谷氨酰胺合酶活性小于 H64, 表明 L45 的铵态氮同化能力弱于 H64。镉胁迫下, 2 个品种小白菜都有游离氨基酸累积的趋势, 尤其是 L45; 而可溶性蛋白含量则降低, 表明镉胁迫下, 游离氨基酸向蛋白质的转化减少, 抑制了氮代谢过程, 且对 L45 抑制更为明显。这一结果与 Li 等^[4]和 Huang 等^[25]的研究结果一致。低镉水平下, 由于氮代谢受阻, H64 的可溶性蛋白含量降低; 而 L45 可溶性蛋白含量增加, 可能是低镉水平抑制了可溶性蛋白向功能蛋白的转化, 或者是由于某些蛋白质的分解造成的, 这也反映出镉对其损害较大。

3.3 镉污染对不同基因型小白菜光合作用的影响

研究表明, 光合作用降低将导致硝酸盐还原过程缺乏能量, 从而降低硝酸还原酶活性^[19]。在低镉条件下, 2 个品种小白菜的净光合速率变化不大, 甚至有所增加, 高镉条件下降低 2 个品种小白菜净光合速率, L45 降低显著, 也表明其对镉耐性较差。低镉条件下, 2 个品种小白菜的气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率均有所升高, 高镉条件则降低 2 个品种的光合参数。Asgher 等^[10]及 Nasraoui-Hajaji 等^[26]关于芥菜和番茄的研究也得到类似的结果。随镉含量的增加, L45 的光合参数变幅较大, 表明其对镉的敏感性较强。本研究中, 在镉胁迫下净光合速率和胞间 CO₂ 浓度协同降低, 表明净光合速率降低的部分原因是由于气孔限制因素, 另有部分原因可能是由于叶绿素含量及相关酶活性等非气孔限制因素的降低造成的^[22]。

镉胁迫下,硝酸盐高积累和低积累品种小白菜的硝酸还原酶活性均显著抑制,且是氮代谢相关指标中最为敏感的生理参数。因此,建议将硝酸还原酶活性作为菜地“镉污染、氮富集”生态监测的速测参数之一。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 顾继光,周启星. 镉污染土壤的治理及植物修复[J]. 生态科学, 2002, 21(4): 352-356.
- [3] CHAVES L H G, ESTRELA M A, SOUZA R S. Effect on plant growth and heavy metal accumulation by sunflower[J]. Journal of Phytology, 2011, 3(12): 4-9.
- [4] LI Y, ZHANG X, YANG Y, et al. Soil cadmium toxicity and nitrogen deposition differently affect growth and physiology in *Toxicodendron vernicifluum* seedlings[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(2): 529-540.
- [5] 赵小虎. 汞镉铅复合污染对蔬菜的影响及其改良措施研究[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2008.
- [6] BALESTRASSE K B, GALLEGRO S M, TOMARO M L. Oxidation of the enzymes involved in nitrogen assimilation plays an important role in the cadmium-induced toxicity in soybean plants[J]. Plant and Soil, 2006, 284(1/2): 187-194.
- [7] HSU Y T, KUO M C, KAO C H. Cadmium-induced ammonium ion accumulation of rice seedlings at high temperature is mediated through abscisic acid[J]. Plant and Soil, 2006, 287(1/2): 267-277.
- [8] WANG L, ZHOU Q, DING L, et al. Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1): 818-825.
- [9] MASOOD A, IQBAL N, KHAN N A. Role of ethylene in alleviation of cadmium-induced photosynthetic capacity inhibition by sulphur in mustard[J]. Plant, Cell and Environment, 2012, 35(3): 524-533.
- [10] ASGHER M, KHAN M I R, IQBAL N, et al. Cadmium tolerance in mustard cultivars: dependence on proline accumulation and nitrogen assimilation[J]. Journal of Functional and Environmental Botany, 2012, 3(1): 1-13.
- [11] KÜPPER H, PARAMESWARAN A, LEITENMAIER B, et al. Cadmium-induced inhibition of photosynthesis and long-term acclimation to cadmium stress in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. New Phytologist, 2007, 175(4): 655-674.
- [12] CHEN L, HAN Y, JIANG H, et al. Nitrogen nutrient status induces sexual differences in responses to cadmium in *Populus yunnanensis* [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14): 5037-5050.
- [13] CHEN B, WANG Z, LI S, et al. Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables [J]. Plant Science, 2004, 167(3): 635-643.
- [14] 张帆, 万雪琴, 王长亮, 等. 镉胁迫下增施氮对杨树生长和光合特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(3): 317-321.
- [15] 张晶, 苏德纯. 秸秆炭化后还田对不同镉污染农田土壤中镉生物有效性和赋存形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1927-1932.
- [16] 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.
- [17] 蔡红梅. 超量表达谷氨酰胺合成酶, 硝酸根转运蛋白和铵离子转运蛋白家族 1 基因对水稻氮代谢的功能研究[D]. 武汉: 华中农业大学图书馆, 2009.
- [18] 张菊平, 崔文朋, 焦新菊, 等. 低浓度镉对小白菜生长及营养元素吸收积累的影响[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(1): 22-28.
- [19] DENG G, LI M, LI H, et al. Exposure to cadmium causes declines in growth and photosynthesis in the endangered aquatic fern (*Ceratopteris pteridoides*) [J]. Aquatic Botany, 2014, 112: 23-32.
- [20] HASAN S A, HAYAT S, AHMAD A. Brassinosteroids protect photosynthetic machinery against the cadmium induced oxidative stress in two tomato cultivars[J]. Chemosphere, 2011, 84(10): 1446-1451.
- [21] CHAFFEI C, PAGEAU K, SUZUKI A, et al. Cadmium toxicity induced changes in nitrogen management in *Lycopersicon esculentum* leading to a metabolic safeguard through an amino acid storage strategy[J]. Plant and Cell Physiology, 2004, 45(11): 1681-1693.
- [22] GILL S S, KHAN N A, TUTEJA N. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.) [J]. Plant Science, 2012, 182: 112-120.
- [23] GOUIA H, HABIB-GHORBAL M, MEYER C. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2000, 38(7): 629-638.
- [24] 冯建鹏, 史庆华, 王秀峰, 等. 镉对黄瓜幼苗光合作用、抗氧化酶和氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 970-974.
- [25] HUANG H, XIONG Z. Toxic effects of cadmium, acetochlor and bensulfuron-methyl on nitrogen metabolism and plant growth in rice seedlings[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2009, 94(2): 64-67.
- [26] NASRAOUI-HAJAJI A, GHARBI F, GHORBEL M H, et al. Cadmium stress effects on photosynthesis and PSII efficiency in tomato grown on NO_3^- or NH_4^+ as nitrogen source[J]. Acta Botanica Gallica, 2010, 157(1): 101-115.

Effects of cadmium stress on nitrogen metabolism and photosynthesis of different Chinese cabbages

QIAN Lei-xiao¹ HU Cheng-xiao¹ ZHAO Xiao-hu^{1,2} WANG Yuan¹
XIN Juan¹ ZHENG Ya-wei¹ TAN Qi-ling¹ SUN Xue-cheng¹

1. Hubei Provincial Engineering Laboratory for New-Type Fertilizer,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Testing and Evaluation for Agro-product Safety and Quality,
Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China

Abstract A pot experiment was conducted to investigate effects of cadmium stress on nitrogen metabolism and photosynthesis of low nitrate accumulator and high accumulator of Chinese cabbages (*Brassica campestris* L. ssp.) Cd was applied with five levels of 0, 0.5, 1.0, 5.0 and 7.0 mg/kg soil. The fresh weight, concentrations of nitrogen, ammonium, free amino acid, and soluble protein, activities of nitrate reductase (NR), glutamine synthetase (GS) of leaves, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 (C_i) and transpiration rate (T_r) were determined. The results showed that the fresh weight of the low nitrate accumulator decreased significantly with the increase of Cd concentration. The concentrations of nitrogen and soluble protein in the leaves of the low nitrate accumulator decreased with the increase of Cd concentration. Accumulations of ammonium and free amino acid in the leaves of both Chinese cabbage cultivars were detected under the Cd stress, especially in the low nitrate accumulator. Cadmium induced a significant inhibition on the activities of nitrate reductase (NR) in both cultivars. Under the Cd stress, activities of nitrate reductase (NR) and glutamine synthetase (GS) in leaves of the low accumulator were lower than those in leaves of the high accumulator. Treated with both 0.5 mg/kg and 1.0 mg/kg, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 (C_i) and transpiration rate (T_r) of both Chinese cabbage cultivars increased. Treated with high Cd concentrations (5.0 mg/kg and 7.0 mg/kg) these parameters were decreased. It is indicated that cadmium disturbed nitrogen metabolism and decreased net photosynthetic rates of both Chinese cabbage cultivars. All indexes of changes for the low nitrate accumulator were greater than that for the high nitrate accumulator.

Key words cadmium; nitrogen; Chinese cabbage; metabolism; photosynthesis

(责任编辑: 陆文昌)