doi：10.11838/sfsc.1673-6257.19467

表油菜素内酯对镉胁迫下番茄幼苗生长及镉累积的影响

俞明宏[1]，王力明[1]，刘　继[2]，李焕秀[3]，林立金[3]，唐　懿[3*]

（1. 四川农业大学园艺学院，四川　成都　611130；2. 成都市农林科学院，四川　成都　611130；3. 四川农业大学果蔬研究所，四川　成都　611130）

摘　要：采用盆栽试验研究不同浓度（0、0.02、0.1、0.5、2.5 mg/L）的表油菜素内酯（EBR）对镉胁迫下番茄幼苗生长及镉累积的影响。结果表明，镉处理后番茄幼苗的生物量、叶绿素含量、抗氧化酶（POD 和 CAT）活性均下降，丙二醛（MDA）含量、相对电导率和渗透调节物质含量均升高；喷施一定浓度的 EBR（0.5 mg/L）后，番茄幼苗的生物量、叶绿素含量、抗氧化酶（POD 和 CAT）活性及脯氨酸含量均显著增加，可溶性蛋白、MDA 含量和相对电导率有所下降，番茄幼苗根系和地上部分的镉含量分别上升了 50.0% 和 93.4%，镉转运系数最低，为 0.45。综上，喷施 EBR 能够增强番茄幼苗对镉胁迫的耐受性，促进幼苗生长，降低镉的转运系数，其中，EBR 浓度为 0.5 mg/L 时效果最好。

关键词：番茄；镉；表油菜素内酯；生理特性

镉是生物毒性最强的重金属之一，被列为“五毒”之首。《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国土壤镉（Cd）污染超标严重，其点位超标率达 7.0%[1]。因蔬菜生产基地多位于城市郊区，这里是工业“三废”和城市垃圾处理的集中地点，所以蔬菜中重金属含量极易超标，蔬菜的生长发育受到严重威胁[2]。而人体中的镉 70% 来源于蔬菜[3]，镉具有累积效应和较强的致癌、致畸、致突变的作用，如果摄入过多会严重影响人体健康[4]。

油菜素内酯（BR）是继生长素、赤霉素、细胞分裂素、脱落酸、乙烯之后的第 6 种植物激素[5]，表油菜素内酯（EBR）是一种人工合成的高活性油菜素内酯类似物，具有促进植物生长，促进细胞伸长和分裂，促进植物光合作用，提高植物抗逆性等多种生理功能[6]。目前研究发现 EBR 对多种植物重金属胁迫具有缓解效应。尹博等[7]发现外源 EBR 能够缓解铜胁迫对番茄植株生长的抑制作用，提高叶绿素含量和生物量，降低番茄根系对 Cu 的吸收与转运。高会玲等[8]研究发现，EBR 可明显提高菊芋的耐镉水平，主要是因为喷施外源 EBR 能显著提高光合色素含量，促进光合作用和提高水分利用效率。Anuradha 等[9]研究发现，EBR 能够缓解高浓度镉对萝卜生长的抑制，增加脯氨酸的积累，提高 CAT、APX、GPX、SOD 的活性。

番茄含有大量的 Vc 和番茄红素，能抗癌防衰，提高人体免疫力。番茄品种类型丰富，既可鲜食作蔬菜又可作水果[10]。有研究表明番茄是镉敏感型的植物[11]，而镉污染情况日益严重，不仅使番茄等蔬菜产量和品质下降，更对人类健康造成威胁[12]。目前关于 EBR 缓解番茄镉胁迫的研究较少，因此，本试验以番茄幼苗为材料，研究了不同浓度的 EBR 对镉胁迫下番茄幼苗生理特性和镉积累的影响，以期筛选出能有效缓解番茄镉胁迫的 EBR 浓度，为镉污染区的番茄安全生产提供一定的参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试材料为番茄幼苗，品种为“紫咖”，是四川农业大学果蔬研究所自留品系，属多代自交系，性状纯合稳定。土壤为潮土，取自四川省成都市温江区农田，其基本理化性质为：pH 值 6.29，有机质 21.16 g/kg，全氮 1.09 g/kg，全磷 1.20 g/kg，全钾 22.21 g/kg，碱解氮 68.12 mg/kg，有效磷 16.22 mg/kg，速效钾 156.21 mg/kg，镉含量 0.10 mg/kg，有效态镉含量 0.028 mg/kg。

收稿日期：2019-09-26；**录用日期**：2019-11-15

基金项目：四川省科技厅项目（18ZDYF0645）。

作者简介：俞明宏（1998-），女，四川广元人，在读本科生，主要从事蔬菜逆境生理生态研究，E-mail：481930697@qq.com。

通讯作者：唐懿，E-mail：95459425@qq.com。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 4 月至 6 月在四川农业大学温江校区进行。将所取土壤经自然风干研磨后过 5 mm 筛，加入形式为分析纯 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$，使土壤镉浓度为 10 mg/kg[13]，并与土壤充分混合，保持土壤湿润，每盆土量 3 kg，自然放置 4 周后再混合均匀备用。EBR 浓度设置参考殷欣等[14]的试验。在 4 月进行穴盘育苗，当 3 ~ 5 片真叶展开时，挑选长势良好且均匀一致的番茄幼苗移栽至盆内，每盆 3 株幼苗，并及时浇水保持土壤湿润。共设 6 个处理：不加镉自然土栽培（CK）、镉 +0 mg/L EBR（T1）、 镉 +0.02 mg/L EBR（T2）、 镉 +0.1 mg/L EBR（T3）、镉 +0.5 mg/L EBR（T4）、镉 +2.5 mg/L EBR（T5）。每组处理 5 盆，重复 3 次，随机排列。CK 和 T1 叶面喷洒蒸馏水至叶面全湿，有水珠滴落为止，其他各处理喷施相应浓度的 EBR 至有水珠滴落为止，喷施时间为每天 18：00，EBR 由同一母液稀释，现配现用。

1.3 样品采集和测定

处理 10 d 后取适量叶片进行生理指标的测定，测定方法参考《植物生理学实验教程》[15]。丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸法测定；相对电导率采用电导率仪（DDS-307 型）测定；过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚比色法测定；过氧化氢酶（CAT）活性采用紫外吸收法测定；脯氨酸（Pro）含量采用磺基水杨酸法测定；可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定；叶绿素含量采用乙醇浸提法测定。之后，收获所有番茄幼苗，用自来水冲洗干净，再用蒸馏水冲洗 3 次，用吸水纸吸干植株表面的残留水分，将植株分成地上部分和根系，用 1% 电子天平先称鲜重，然后置于烘箱内，105℃下杀青 30 min，75℃恒温烘干，冷却后称重，称取生物量后粉碎待测，并计算含水量及根冠比。将植物干样用硝酸 – 高氯酸（体积比为 4 : 1）放置 12 h 后消化至溶液透明，过滤，定容至 50 mL，用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪（Thermo scientific，USA）测定地上部分和根系镉含量。

1.4 统计处理

数据采用 Excel 2010 进行绘图，用 SPSS 22.0 软件进行数据处理，并进行 Duncan 差异显著性分析。地上部分含水量（%）=（地上部分鲜重 – 地上部分干重）/ 地上部分鲜重 ×100，根系含水量（%）=（根系鲜重 – 根系干重）/ 根系鲜重 ×100，根冠比 = 根系生物量 / 地上部分生物量（干重），转运系数 = 地上部分镉含量 / 根系镉含量。

2 结果与分析

2.1 EBR 对镉胁迫下番茄幼苗生物量的影响

如表 1 所示，与 CK 相比，镉处理后幼苗的地上部分干重和根系干重分别下降了 28.0%（$P<0.05$）和 78.1%（$P<0.05$），地上部分含水量和根系含水量分别下降了 0.6%（$P<0.05$）和 1.6%（$P<0.05$），根冠比下降了 70.3%（$P<0.05$）。当 EBR 浓度为 0.5 mg/L（T4）时，地上部分干重和根系干重比单独镉胁迫（T1）分别显著增加 22.9%（$P<0.05$）和 139.4%（$P<0.05$），地上部分含水量和根系含水量分别上升了 0.5%（$P<0.05$）和 1.2%（$P<0.05$），根冠比上升了 94.7%（$P<0.05$）。表明外源喷施 EBR 可以有效缓解镉胁迫对番茄幼苗影响，促进番茄幼苗生长，提高含水量和根冠比，0.5 mg/L（T4）效果最明显。

表 1 EBR 对镉胁迫下番茄幼苗生物量的影响

处理	地上部分干重（g/株）	根系干重（g/株）	地上部分含水量（%）	根系含水量（%）	根冠比
CK	4.11 ± 0.11 a	1.51 ± 0.08 a	92.41 ± 0.20 a	85.07 ± 0.28 a	0.37 ± 0.07 a
T1	2.96 ± 0.14 d	0.33 ± 0.03 d	91.89 ± 0.20 b	83.72 ± 0.23 c	0.11 ± 0.06 c
T2	3.27 ± 0.08 c	0.33 ± 0.06 d	91.94 ± 0.23 b	84.27 ± 0.17 b	0.10 ± 0.04 c
T3	3.38 ± 0.06 bc	0.61 ± 0.04 c	92.19 ± 0.28 ab	84.36 ± 0.13 b	0.18 ± 0.06 b
T4	3.64 ± 0.11 b	0.79 ± 0.06 b	92.34 ± 0.12 a	84.70 ± 0.21 ab	0.22 ± 0.07 b
T5	3.58 ± 0.15 b	0.67 ± 0.04 c	92.30 ± 0.16 ab	84.66 ± 0.35 ab	0.19 ± 0.10 b

注：表中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），数值 = 平均值 ± 标准差，下同。

2.2 EBR 对镉胁迫下番茄幼苗镉积累和转运的影响

由表 2 可知，与 CK 相比，镉处理后番茄幼苗镉积累量明显增加。与 T1 相比，喷施不同浓度的 EBR 后，番茄幼苗的地上部分和根系镉含量均有

所增加，说明喷施外源 EBR 对该品种番茄幼苗的镉吸收有一定的促进作用，其中，当 EBR 浓度为 0.5 mg/L（T4）时，地上部分和根系镉含量分别比 T1 增加了 50.0%（P<0.05）和 93.4%（P<0.05），转移系数最低，为 0.45，说明 EBR 能阻碍重金属镉从根系转移到地上部分，浓度为 0.5 mg/L（T4）时效果最好。

表 2　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗镉积累和转运的影响

处理	地上部分镉含量（mg/kg）	根系镉含量（mg/kg）	转运系数
CK	0.03 ± 0.01e	0.05 ± 0.01e	0.61 ± 0.03a
T1	18.29 ± 0.96d	33.67 ± 2.67d	0.55 ± 0.07ab
T2	22.18 ± 0.97c	38.71 ± 3.14c	0.58 ± 0.05a
T3	25.08 ± 0.73b	50.60 ± 2.40b	0.50 ± 0.02b
T4	27.36 ± 1.26a	65.14 ± 0.91a	0.45 ± 0.02b
T5	21.10 ± 0.60c	35.60 ± 3.25cd	0.59 ± 0.04a

2.3　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗叶片中光合色素含量的影响

如表 3 所示，与 CK 相比，T1 番茄幼苗叶绿素 a、b、类胡萝卜素含量和叶绿素总量分别显著下降了 42.4%（P<0.05）、50.4%（P<0.05）、48.0%（P<0.05）和 46.1%（P<0.05），叶绿素 a/b 值上升了 13.8%（P<0.05）。当喷施的 EBR 浓度为 0.5 mg/L（T4）时，叶绿素 a、b、类胡萝卜素含量和叶绿素总量比 T1 显著提升 66.7%（P<0.05）、36.4%（P<0.05）、42.3%（P<0.05）和 56.6%（P<0.05）。当喷施的 EBR 浓度为 0.1 mg/L（T3）时，叶绿素 a/b 比 T1 显著提升了 47.5%（P<0.05）。表明喷施外源 EBR 可以通过提高光合色素含量来提高番茄幼苗对镉胁迫的耐受性，0.1 mg/L（T3）和 0.5 mg/L（T4）效果均良好。

表 3　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗叶片中光合色素含量的影响

处理	叶绿素 a 含量（mg/g）	叶绿素 b 含量（mg/g）	类胡萝卜素含量（mg/g）	叶绿素总量（mg/g）	叶绿素 a/b
CK	2.29 ± 0.03 a	1.33 ± 0.13 a	1.00 ± 0.05 a	3.67 ± 0.16 a	1.74 ± 0.16 c
T1	1.32 ± 0.02 b	0.66 ± 0.01 c	0.52 ± 0.01 d	1.98 ± 0.01 d	1.98 ± 0.02 b
T2	1.35 ± 0.01 b	0.77 ± 0.02 c	0.55 ± 0.01 c	2.12 ± 0.02 c	1.75 ± 0.02 d
T3	2.22 ± 0.03 a	0.76 ± 0.03 c	0.71 ± 0.01 b	2.89 ± 0.03 b	2.92 ± 0.07 a
T4	2.20 ± 0.15 a	0.90 ± 0.02 b	0.74 ± 0.01 b	3.10 ± 0.13 b	2.44 ± 0.11 a
T5	1.34 ± 0.01 b	0.95 ± 0.05 b	0.56 ± 0.01 c	2.30 ± 0.05 c	1.42 ± 0.07 d

2.4　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗叶片膜脂过氧化的影响

由表 4 可知，与 CK 相比，T1 番茄幼苗叶片中的 POD、CAT 活性分别下降了 12.6%（P<0.05）和 16.1%（P<0.05），MDA 含量和相对电导率分别显著上升了 69.4%（P<0.05）和 174.5%（P<0.05），喷施外源 EBR 后能提高 POD、CAT 活性，当 EBR 浓度为 0.1 mg/L（T3）POD 活性均较单独镉处理（T1）显著升高 15.4%（P<0.05）、65.4%（P<0.05），说明外源 EBR 能通过提高抗氧化酶活性来提高番茄幼苗镉胁迫的耐受性，浓度为 0.1 mg/L（T3）时提高抗氧化酶活性最明显。而喷施外源 EBR 可有效降低 MDA 含量和相对电导率，当喷施 EBR 浓度为 0.5 mg/L（T4）时，番茄幼苗叶片中 MDA 含量和相对电导率较单一镉处理（T1）下降了 55.5%（P< 0.05）和 27.6%（P<0.05），说明 EBR 能对镉胁迫造成的膜脂过氧化伤害起到一定的缓解作用，降低质膜透性，浓度为 0.5 mg/L（T4）时效果最好。

表 4　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗叶片膜脂过氧化的影响

处理	POD 活性［U/（g·min）］	CAT 活性［U/（g·min）］	MDA 含量（μmol/g）	相对电导率（%）
CK	629.45 ± 22.06 a	235.25 ± 20.58 c	0.036 ± 0.007 b	6.46 ± 0.82 e
T1	550.83 ± 18.01 b	197.38 ± 9.01 d	0.061 ± 0.004 a	17.73 ± 0.57 a
T2	570.85 ± 15.77 b	290.22 ± 10.35 b	0.038 ± 0.004 b	16.90 ± 0.40 ab
T3	634.28 ± 13.91 a	326.50 ± 14.68 a	0.031 ± 0.005 b	16.30 ± 0.70 b
T4	632.52 ± 19.04 a	307.77 ± 28.02 ab	0.027 ± 0.004 b	12.83 ± 0.55 d
T5	625.30 ± 20.19 a	280.95 ± 17.04 b	0.035 ± 0.006 b	15.03 ± 0.51 c

2.5　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗叶片中渗透调节物质含量的影响

由图 1 和图 2 可知，与 CK 相比，T1 番茄幼苗叶片中的可溶性蛋白和脯氨酸含量显著升高 96.0%（P<0.05）和 156.8%（P<0.05）。T4 番茄幼苗叶片中的可溶性蛋白比 T1 下降 37.4%（P<0.05），T3 番茄幼苗叶片中的脯氨酸含量比 T1 显著增加了 26.7%（P<0.05）。说明外源 EBR 可以使细胞膜渗透损伤降低，0.5 mg/L EBR（T4）对降低可溶性蛋白含量最有效，0.1 mg/L EBR（T3）对提高脯氨酸含量最有效。

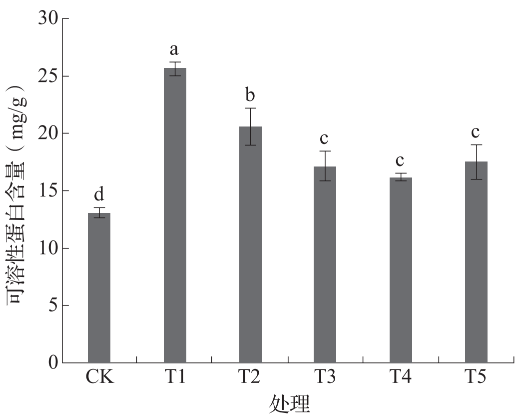

图 1　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗叶片中可溶性蛋白含量的影响

注：图中不同小写字母表示差异显著（P<0.05），下同。

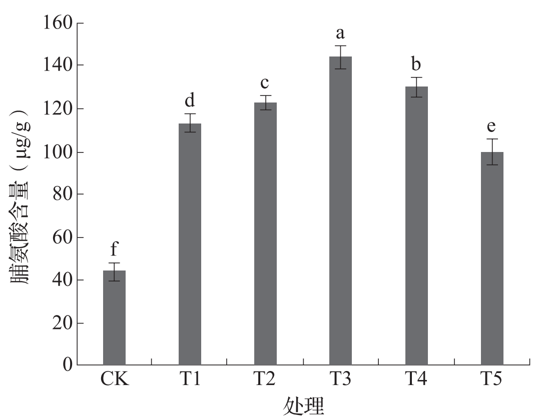

图 2　EBR 对镉胁迫下番茄幼苗叶片中脯氨酸含量的影响

3　讨论

镉是植物生长过程中非必需元素，当植株体内蓄积了一定量的镉后，就会导致植物叶片退绿、植株生长迟缓、生物量、产量和品质下降等现象[16]。Hasan 等[17]研究发现 EBR 能改善镉胁迫下番茄幼苗的生长状况。本试验结果表明，镉处理后番茄幼苗的生物量降低，喷施外源 EBR 可以有效缓解镉对番茄幼苗的影响，增加其干重，提高含水量和根冠比，促进番茄幼苗的生长，这与 Hayat 等[18]研究结果一致。EBR 能促进植物生长可能是因为它能够调节细胞壁合成和修饰从而影响了细胞的伸长和分裂[19]。

不同基因型的番茄对镉的吸收存在差异[20]，由于处理浓度和时间不同，EBR 对植物镉积累的影响也不同。Ahammed 等[21]研究发现施用 EBR 后，番茄叶片和根系中镉含量显著降低。但本试验中喷施外源 EBR 对该品种番茄吸收积累镉有一定的促进作用，无论是地上部分还是根系部分镉含量均有所增加，这可能是因为番茄的品种不同而导致番茄对镉的积累不同。窦巧惠等[22]研究发现外施 EBR 能促进番茄根系有机酸分泌，有机酸可以作为螯合剂与镉螯合后阻止其以共质体途径横向运输，进而减少镉向地上部分转移[23]，本试验中一定浓度的 EBR 能降低镉的转运系数可能与 EBR 能促进番茄体内螯合剂的分泌有关，但 EBR 对番茄幼苗镉积累及转运机制还有待进一步探究。

光合色素的含量可以作为衡量植物对重金属胁迫耐受性的一个重要指标。有研究发现镉胁迫后大麦幼苗叶绿素含量下降，而在喷施 EBR 后叶绿素含量上升，说明 EBR 可以在一定程度上保护光合系统，缓解镉胁迫对叶绿素的降解[24]。本试验中，镉处理后番茄幼苗叶片的叶绿素和类胡萝卜素含量均降低，喷施一定浓度的 EBR 后叶绿素总量上升，叶绿素 a/b 值升高。说明 EBR 可以通过提高光合色素的含量，防止叶绿素降解，促进光合作用来提高番茄幼苗对镉胁迫的耐受性。这可能是因为 EBR 激活了叶绿素合成过程中某些酶的活性或诱导了叶绿素合成酶特定基因的表达[25]。

当植物受到重金属胁迫时，体内会产生大量的活性氧自由基（ROS），当 ROS 含量增加时会引起脂质过氧化，MDA 是细胞膜脂质过氧化的最终产物，其含量高低反映了脂质过氧化的强弱程度，电导率是衡量植株细胞内容物扩散的一项生理指标[26]，而 POD 和 CAT 可以清除活性氧自由基来抵御 ROS 对细胞膜造成的伤害。王芳等[27]研究发现，镉胁迫下玉米幼苗 POD、CAT 活性都有大幅度下降，MDA 含量和质膜透性显著升高，加入一定浓度的 EBR 后抗氧化酶活性升高，MDA 含量和质

膜透性显著降低。本试验中，镉处理后番茄幼苗叶片中的 POD、CAT 活性明显下降，喷施一定浓度的 EBR 后 POD、CAT 活性均较单独镉处理显著升高，说明 EBR 可以通过增加抗氧化酶的活性，来提高番茄对镉胁迫的耐受性。这可能是因为 EBR 的应用诱导了 H_2O_2 的升高，从而激活了抗氧化酶合成的代谢途径[28]。本试验结果表明 EBR 对镉胁迫造成的番茄幼苗脂膜过氧化伤害能起到有效地缓解作用，这与李晓科等[24]的研究结果类似。

可溶性蛋白和脯氨酸是两种重要的渗透调节物质，重金属胁迫下会迅速积累，调节细胞渗透压，从而抵消重金属所造成的伤害，维持细胞正常的结构和功能[29]。本试验中，镉处理后番茄幼苗的可溶性蛋白和脯氨酸含量显著升高可视为番茄幼苗对镉胁迫的生理性保护性适应。有研究发现镉可以提高蛋白水解酶的活性，使原有蛋白质分解；同时镉对蛋白合成的众多酶系均有毒害和钝化作用，抑制新蛋白的合成[27]，所以本试验中喷施一定量的 EBR 后，番茄幼苗叶片中的可溶性蛋白含量下降可能是因为 EBR 促进了镉的吸收积累而导致蛋白质合成受阻。本试验中喷施 EBR 后脯氨酸含量上升可能是因为脯氨酸参与了番茄体内活性氧自由基的清除[30]，这与窦巧惠等[22]的研究结果一致。

4　结论

喷施外源 EBR 可以有效缓解镉胁迫对番茄幼苗的影响，促进番茄幼苗生长，促进对镉吸收但能降低镉的转移系数，提高光合色素的含量，增加抗氧化酶的活性，修复损伤细胞膜，缓解脂膜过氧化伤害，降低叶片电导率，还能使渗透程度降低，可溶性蛋白减少，脯氨酸含量增加。当 EBR 浓度为 0.5 mg/L（T4）时，缓解番茄幼苗镉胁迫效果最明显。

参考文献：

［1］　全国土壤污染状况调查公报［J］．中国环保产业，2014，（5）：10-11.

［2］　刘希元，吴春燕，张广臣，等．蔬菜重金属污染与防治研究综述［J］．安徽农业科学，2019，（15）：10-12，17.

［3］　孙光闻，朱祝军，方学智，等．我国蔬菜重金属污染现状及治理措施［J］．北方园艺，2006，（2）：66-67.

［4］　邓新，温璐璐，迟鑫姝．镉对人体健康危害及防治研究进展［J］．中国医疗前沿，2010，5（10）：4-5.

［5］　Sasse J M. Recent progress in brassinosteroid research［J］. Physiol Plant，1997，100（3）：696-701.

［6］　郑洁，王磊．油菜素内酯在植物生长发育中的作用机制研究进展［J］．中国农业科技导报，2014，16（1）：52-58.

［7］　尹博，梁国鹏，贾文，等．外源油菜素内酯介导 Cu 胁迫下番茄生长及 Cu、Fe、Zn 的吸收与分配［J］．中国生态农业学报，2014，（5）：578-584.

［8］　高会玲，刘金隆，郑青松，等．外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应［J］．生态学报，2013，33（6）：1935-1943.

［9］　Anuradha S，Rao S. The effect of brassinosteroids on radish（*Raphanus sativus* L.）seedlings growing under Cadmium stress［J］. Plant Soil and Environment，2007，53（11）：465-472.

［10］　霍建勇．中国番茄产业现状及安全防范［J］．蔬菜，2016，（6）：1-4.

［11］　丁枫华，刘术新，罗丹，等．23 种常见作物对镉毒害的敏感性差异［J］．环境科学，2011，32（1）：277-283.

［12］　陈玉梅，和苗苗，宁皎莹，等．蔬菜地重金属镉污染植物修复研究进展［J］．上海农业学报，2015，31（1）：110-117.

［13］　孙国超，李红艳，廖明安，等．混种石竹科富集植物对树番茄幼苗镉积累的影响［J］．湖南农业科学，2019，（2）：13-17.

［14］　殷欣，张海玲，吴杨，等．24- 表油菜素内酯对镉胁迫下大豆苗期生理特性的影响［J］．核农学报，2016，（2）：364-371.

［15］　熊庆娥．植物生理学实验教程［M］．成都；四川科学技术出版社，2003.

［16］　孙梦梦，徐劼，张玲玲，等．硅对镉胁迫下植物生长影响的研究进展［J］．广州化工，2019，47（13）：41-43.

［17］　Hasan S A，Hayat S，Ahmad A. Brassinosteroids project photosynthetic machinery against the cadmium include oxidative stress in two tomato cultivars［J］. Chemosphere，2011，84（10）：1446-1451.

［18］　Hayat S，Alyemeni M N，Hasan S A. Foliar spray of brassinosteroid enhances yield and quality of Solanum lycopersicum under cadmium stress［J］. Saudi Journal of Biological Sciences，2012，19（3）：325-335.

［19］　Haubrick L L，Assmann S M. Brassinosteroids and plant function：some clues，more puzzles［J］. Plant Cell and Environment，2006，29（3）：446-457.

［20］　张微，吕金印，柳玲．不同基因型番茄幼苗对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异［J］．农业环境科学学报，2010，（6）：1065-1071.

［21］　Ahammed G J，Choudhary S P，Chen S，et al. Role of brassinosteroids in alleviation of phenanthrene-cadmium co-contamination-induced photosynthetic inhibition and oxidative stress in tomato［J］. Journal of Experimental Botany，2013，64（1）：199-213.

［22］　窦巧惠，王娟，尹博，等．外源油菜素内酯（EBR）对 Cu 胁迫期间番茄幼苗的缓解效应［J］．植物生理学报，2015，（3）：287-294.

［23］　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.
［24］ 李晓科，武玉珍，张义贤．2，4- 表油菜素内酯对镉胁迫下大麦幼苗生长的影响［J］．福建农业学报，2018，33（12）：1251-1256.
［25］ Fariduddin Q，Mir B A，Yusuf M，et al. 24-epibrassinolide and/or putrescine trigger physiological and biochemical responses for the salt stress mitigation in *Cucumis sativus* L［J］．Photosynthetica，2014，52（3）：464-474.
［26］ 范晶，黄明远，许雁霞．盐胁迫对番茄种子萌发及叶片中丙二醛含量的影响［J］．北方园艺，2011，25（10）：27-29.
［27］ 王芳，彭云玲，方永丰，等．外源油菜素内酯对玉米幼苗镉毒害耐受性的影响［J］．干旱地区农业研究，2018，36（5）：21-27.
［28］ Ding J，Shi K，Zhou Y H，et al. Effects of root and foliar applications of 24-epibrassinolide on fusarium wilt and antioxidant metabolism in cucumber roots［J］．Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science，2009，44（5）：1340-1345.
［29］ 张义贤，李晓科．镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响［J］．植物研究，2008，28（1）：43-46，238.
［30］ 丁海东，齐乃敏，朱为民，等．镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及其脯氨酸与谷胱甘肽含量的影响［J］．中国生态农业学报，2006，14（2）：53-55.

Effects of epibrassinolide on the growth and cadmium accumulation of tomato seedlings under cadmium stress

YU Ming-hong[1]，WANG Li-ming[1]，LIU Ji[2]，LI Huan-xiu[3]，LIN Li-jin[3]，TANG Yi[3*]（1. College of Horticulture，Sichuan Agricultural University，Chengdu Sichuan 611130；2. Chengdu Academy of Agricultural and Forestry Sciences，Chengdu Sichuan 611130；3. Institute of Pomology and Olericulture，Sichuan Agricultural University，Chengdu Sichuan 611130）

Abstract：A pot experiment was conducted to study the effects of epibrassinolide（EBR）with different concentrations（0，0.02，0.1，0.5，2.5 mg/L）on the growth and cadmium accumulation of tomato seedlings under cadmium stress. The results showed that the biomass，chlorophyll content and antioxidant enzymes（POD and CAT）activities of tomato seedlings decreased，while the contents of malondialdehyde，relative conductivity and osmotic regulators increased after cadmium treatment. After spraying EBR（0.5 mg/L）at a certain concentration，the biomass，chlorophyll content，antioxidant enzyme activity（POD and CAT）and proline content of tomato seedlings increased significantly，while the soluble protein，malondialdehyde and relative conductivity decreased，cadmium content in roots and aboveground parts of tomato seedlings increased by 50.0% and 93.4% respectively，and the cadmium transfer coefficient was the lowest at 0.45. In conclusion，spraying EBR could enhance the tolerance of tomato seedlings to cadmium stress，promote the growth of tomato seedlings，and reduce cadmium transport coefficient. EBR concentration of 0.5 mg/L was the best.

Key words：tomato；cadmium；epibrassinolide；physiological characteristics